

## Formation d'image accompagnée d'une analyse spectrale en champ complet : de J. Fourier à G. Lippmann

Alain Marraud <sup>(1)</sup> et Jean-Marc Fournier <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> MSS-Mat, ECP, Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France

<sup>(2)</sup> Rowland Institute for Science, 100 E H. Land Boulevard, Cambridge, MA 02142, USA

(Reçu le 28 janvier 1997, accepté le 30 janvier 1997)

PACS.01.60.+q – Biographical, historical, and personal notes

PACS.07.68.+m – Photography, photographic instruments and techniques; xerography

PACS.02.30.Nw – Fourier analysis

PACS.42.30.Kq – Fourier optics

**Résumé.** — La transformée de Fourier est un outil conceptuel universellement appliqué depuis plusieurs dizaines d'années dans deux domaines de l'optique : l'imagerie et la spectroscopie. Ces succès ne devraient pas faire oublier que G. Lippmann avait, dès 1894, introduit cette technique pour expliquer sa méthode d'enregistrement interférentiel des couleurs. Remarquons que la transformée de Fourier utilisée par Lippmann fait appel aux fréquences temporelles alors que celle mise en œuvre par Duffieux utilise les fréquences spatiales.

**Abstract.** — The concept of Fourier Transform has been extensively used for decades in spectroscopy as well as in image science. This should not overshadow the work of G. Lippmann. This scientist applied Fourier techniques as early as 1894 to give a full theory of his photographic process of color encoding. Lippmann's explanation calls for temporal frequencies; conversely, Duffieux's works relies on spatial frequencies.

La transformation de Fourier joue aujourd'hui un rôle fondamental dans deux domaines de l'optique : l'imagerie et la spectroscopie. Sous sa forme actuelle, cette technique a été introduite en 1946 par P.M. Duffieux ("L'intégrale de Fourier et ses applications à l'Optique") [1] pour expliquer le mécanisme de la formation des images. Dans les années 60, J. Connes [2] introduisit la spectroscopie par transformée de Fourier qui permit aussitôt d'améliorer considérablement la résolution spectrale, notamment dans le domaine de l'infrarouge. Les idées de P.M. Duffieux puis celles de J. Connes et de P. Connes ont eu un retentissement considérable. Elles ont été tout de suite acceptées et très rapidement ces méthodes se sont révélées extrêmement fécondes et ont suscité de nombreux travaux. Il est curieux de constater que plus de 50 ans auparavant, l'intégrale de Fourier avait déjà été introduite dans le champ de l'optique.

A la fin des années 1880, l'un des grands débats scientifiques concernait la nature de la vibration lumineuse et le bien fondé de la théorie électromagnétique de J. Maxwell. On s'accordait bien pour admettre que la lumière consiste en des vibrations transversales au rayon lumineux, mais Neumann et Mc Cullach pensaient que ces vibrations avaient lieu dans le plan de polarisation. Fresnel avait avancé l'hypothèse opposée, soutenant que la vibration était normale

au plan de polarisation. Qui de Fresnel ou de Neumann avait raison ? Plusieurs chercheurs, de manière totalement indépendante, travaillaient en même temps sur ce sujet. L'honneur de la première publication de résultats incontestables revint à O. Wiener en 1890. G. Lippmann qui travaillait sur le même sujet a voulu valoriser malgré tout son travail et a très rapidement publié une note sur "la photographie des couleurs" [3]. En ce temps-là, très rapidement signifiait quelques jours. En effet c'est à la séance du 26 janvier 1891 que A. Cornu signale à ses collègues de l'Académie des Sciences les résultats d'"une expérience récente déterminant la direction de la vibration lumineuse de la lumière polarisée". A la séance suivante, le 2 février, G. Lippmann non seulement présente sa note sur "la photographie des couleurs" mais, de plus, l'accompagne d'une réalisation expérimentale : il montre une très belle photographie en couleurs d'un spectre. Le 9 février, H. Poincaré apporte quelques objections quant à l'interprétation de l'expérience de O. Wiener. Le 16 février, A. Cornu présente ses excuses car il avait rapporté une version abrégée de l'article de Wiener. Il précise que celui-ci avait prévu ces objections et y avait répondu par avance. Quelques années plus tard O. Wiener deviendra l'un des experts incontestés du procédé Lippmann de photographie interférentielle des couleurs.

Rappelons brièvement la méthode proposée par G. Lippmann. Celui-ci utilise une chambre photographique usuelle, pour son époque, mais l'émulsion photographique et le porte-film sont spécifiques. L'émulsion photographique, pratiquement sans grain, est étendue sur une plaque de verre et celle-ci "*est portée par un châssis creux où l'on verse du mercure. Ce mercure forme une lame réfléchissante en contact avec la couche sensible. L'exposition, le développement, le fixage se font comme si on voulait obtenir un négatif... ; mais le résultat est différent : lorsque le cliché est terminé et séché, les couleurs apparaissent. Le cliché est négatif par transparence, c'est-à-dire que chaque couleur est représenté par sa complémentaire. Par réflexion, il est positif et on voit la couleur elle-même.*"

Ainsi G. Lippmann fait un double enregistrement : sur la surface de l'émulsion, une image au sens classique du terme, formée par un objectif ; dans l'épaisseur de l'émulsion photosensible, une information relative à la couleur de l'élément de surface correspondant. Écoutons G. Lippmann nous donner une explication.

"*La théorie de l'image est très simple. La lumière incidente, qui forme l'image dans la chambre noire, interfère avec la lumière réfléchi par le mercure. Il se forme, par la suite, dans l'intérieur de la couche sensible, un système de franges*". L'émulsion photographique contient donc un système de plans d'argent équidistants, séparés par un intervalle égal à la moitié de la longueur d'onde. On comprend pourquoi il fallait que l'émulsion fût sans grain. Lorsqu'on éclaire avec de la lumière blanche la plaque développée, ces plans semi-transparents créent une interférence constructive en réflexion uniquement pour la longueur d'onde égale au double de celle correspondant à l'intervalle entre ces plans, c'est-à-dire à la couleur de la scène enregistrée. L'interférence est destructive pour toutes les autres longueurs d'onde.

Cette théorie explique très simplement l'enregistrement, et l'observation, de ce que G. Lippmann appelle des "couleurs simples", c'est-à-dire des couleurs correspondant à une lumière monochromatique ou de bande spectrale très étroite. Mais généralement la couleur des objets usuels, ceux qu'on photographie, correspond à des domaines spectraux larges, ce que G. Lippmann appelle des "couleurs hétérogènes" ou "couleurs composées". Or les photographies Lippmann sont capables d'enregistrer et de restituer ce type de spectres, par exemple la couleur de la neige ou celle d'un "rocher rose" [4].

La théorie simple exposée ci-dessus ne rend absolument pas compte du phénomène. Si on divise le large spectre en bandes spectrales étroites, une bande donne naissance à un système de franges d'interférence qui se superpose à ceux des autres bandes. Comment expliquer alors la restitution des couleurs uniquement avec les notions d'interférences destructives et constructives ? G. Lippmann avait bien conscience du problème et a établi la théorie complète

du phénomène en 1894 [5]. Pour rendre compte du phénomène, il doit calculer deux intégrales qui : “sont analogues à une intégrale double découverte par Fourier. Pour le démontrer, on peut avoir recours non à l'analyse de Fourier mais à la démonstration géométrique qu'il y a ajouté et qui est plus générale. Afin de faciliter le rapprochement, il convient de développer à l'aide de la série trigonométrique de Fourier...”. Traduite en termes plus contemporains, l'idée de G. Lippmann est que l'enregistrement dans l'épaisseur de l'émulsion photographique correspond à une transformée de Fourier temporelle du domaine spectral de la lumière incidente. A l'observation, le processus est identique et correspond à une transformation inverse. Évidemment, G. Lippmann n'emploie pas le même vocabulaire, mais il est très conscient de ces deux opérations successives et de la physique qui est derrière. Il en écrit l'équation (l'intégrale double, dite “de Fourier”). Dans sa note de 1894, il ne cite qu'une seule référence : “Oeuvres complètes de Fourier, éditées par M. G. Darboux”.

Il est incontestable que G. Lippmann a introduit une nouvelle méthode mathématique pour l'optique. On peut s'interroger sur le silence complet et persistant qui a suivi cette tentative. Peut-être les opticiens n'étaient pas prêts, à l'époque, pour recevoir une telle nouveauté.

Pour terminer l'histoire dont on trouvera par ailleurs la genèse et les péripéties [6, 7], rappelons qu'après un succès éclatant mais bref, le procédé Lippmann a été vite abandonné au profit d'autres procédés de photographie en couleurs. Il a été repris quelques décennies plus tard pour la réalisation de filtres monochromatiques [8] dont la fabrication a duré jusque dans les années 50. Puis plus de 70 ans après son apparition, il a été le fondement d'un renouveau de l'holographie [9].

Quoiqu'il en soit, pour le physicien d'aujourd'hui, regarder une photographie Lippmann est un éblouissement, non seulement pour ses qualités esthétiques mais aussi parce qu'on y voit à l'œuvre deux doubles transformées de Fourier, l'une, spatiale, pour la formation de l'image, l'autre, temporelle, pour l'observation des couleurs.

## Bibliographie

- [1] Duffieux P.M., L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique, (Chez l'auteur, Faculté des Sciences, Besançon ; Rennes, S.A. des imprimeries Oberthur, 1946) ; deuxième édition (Masson, Paris, 1970).
- [2] Connes J., Études de spectroscopie utilisant la transformation de Fourier, *Rev. Opt.* **40** (1961) 45-78; 116-140; 171-190.
- [3] Lippmann G., La photographie des couleurs, *CRAS* **112** (1891) p. 274.
- [4] Fournier J.M., Color Rendition and Archival Properties of Lippmann Photographs, *J. Imag. Sci. Tech.* **38** (1994) p. 507.
- [5] Lippmann G., Sur la théorie de la photographie des couleurs simples et composées par la méthode interférentielle, *CRAS* **118** (1894) p. 92.
- [6] Connes P., Silver salts and standing waves: the history of interference colour photography, *J. Optics* **18** (1987) p. 147.
- [7] Fournier J.M., La photographie en couleurs de type Lippmann : cent ans de physique et de technologie, *J. Optics* **22** (1991) p. 259.
- [8] Ives H., Lippmann colour photography as source of monochromatic light in photometry, *J.O.S.A.* **1** (1917) p. 50.
- [9] Denisyuk Y.N., Fundamentals of Holography, (State Optical S. I. Vavilov Institute, Leningrad, 1978).