

Enseignement et préservation du patrimoine scientifique à l'Université de Franche-Comté

Partie II : 1930-1970

Besançon : jeudi 2 mai 2024

par Jérôme SALVI, Jeanne MAGNIN, Maxime JACQUOT, Luc FROEHLY, John DUDLEY

Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST, 25000 Besançon

jerome.salvi@umlp.fr

magninjeanne14@gmail.com

maxime.jacquot@umlp.fr

luc.froehly@umlp.fr

john.dudley@umlp.fr

Lucie VIDAL, Jérémy QUERENET

Université Marie et Louis Pasteur, Service sciences arts culture, 25000 Besançon

lucie.vidal@umlp.fr

jeremy.querenet@umlp.fr

et Pierre VERSCHUEREN

Université Marie et Louis Pasteur, Centre Lucien Febvre, 25000 Besançon

pierre.verschueren@umlp.fr

Des archives et instruments récemment découverts à l'Université de Franche-Comté dévoilent l'histoire de la recherche et de l'enseignement en physique depuis la création de la Faculté des sciences 1845. Cet article fait suite à un premier consacré au XIX^e siècle et décrit le parcours de deux enseignants-chercheurs majeurs de la Faculté des sciences de Besançon au XX^e siècle : Jean-Jacques Trillat, avant la Seconde Guerre mondiale, et Pierre Michel Duffieux, après 1945, qui a introduit l'analyse de Fourier en optique, concept clef mais souvent obscur pour les étudiants. Dans ce cadre nous proposons également l'étude d'un analyseur harmonique de Mader-Ott, utilisé entre 1909 et 1960, pour aider les étudiants à mieux comprendre les principes fondamentaux du calcul des harmoniques.

1. Introduction

En 2023, l'Université de Franche-Comté a célébré ses 600 ans, marquant une occasion unique pour valoriser et préserver documents et instruments scientifiques. Cette démarche a notamment conduit à la constitution d'une collection et à l'intégration d'anciens appareils scientifiques dans l'enseignement illustrée par l'introduction d'un instrument du XIX^e siècle (le spectrophotomètre de Fery) dans la référence [1] La référence [2] retrace elle l'histoire de la faculté des sciences à Besançon de sa création en 1845 jusqu'en 1970 et cet article se concentre lui sur le XX^e siècle en évoquant tout d'abord deux professeurs de physique majeurs¹, suivie d'une illustration de la réutilisation dans nos enseignements modernes d'un instrument de mesure de l'après-guerre : l'analyseur harmonique de Mader-Ott en lien avec les recherches de P.M. Duffieux

L'essor des revues scientifiques, des conférences et la structuration de la recherche française au XX^e siècle ont facilité la conservation des archives par rapport au XIX^e siècle malgré les pertes causées par la Seconde Guerre mondiale. Après la Première Guerre mondiale, l'université a produit des avancées notables en optique et dans des domaines connexes, notamment grâce à Pierre-Michel Duffieux (1891-1976), pionnier

¹ La liste complète des titulaires de la chaire de Physique à la faculté des sciences de l'Université de Franche-Comté entre 1845 et 1963 peut être consultées dans la référence [1].

de l'Optique de Fourier, et à son successeur Jean-Charles Vienot (1930-2022). Pour compléter cette histoire, des témoignages oraux d'anciens membres du laboratoire, aujourd'hui retraités, ont été collectés. Ces enregistrements enrichissent le patrimoine immatériel, en capturant des souvenirs clés du développement scientifique, notamment sur l'évolution de l'optique avant et après l'apparition du laser. L'enregistrement de ces témoignages se fait avec une grande précaution, en respectant strictement les critères juridiques et éthiques de protection des données personnelles. Les entretiens, même abrégés, peuvent ouvrir de nouvelles perspectives souvent inexplorées dans les archives publiques, apportant des éclairages inédits sur l'histoire scientifique de l'université.

2. Les chaires de physique de 1930 à 1970 à Besançon

2.1. Jean-Jacques Trillat (1899-1987)

Après avoir obtenu son diplôme d'ingénieur à l'ESPCI en 1923, Jean-Jacques Trillat [3-5] commence un doctorat à l'Institut Pasteur où il rencontre Maurice de Broglie (1875-1960) qui réoriente ses recherches vers la diffraction des rayons X. Trillat réalise ses expériences dans le laboratoire privé de de Broglie [6] et obtient son doctorat ès sciences physiques en 1926 [7]. Au cours de cette période, Trillat rencontre également Louis de Broglie (figure 1), et découvre la mécanique quantique et la dualité onde-corpuscule.

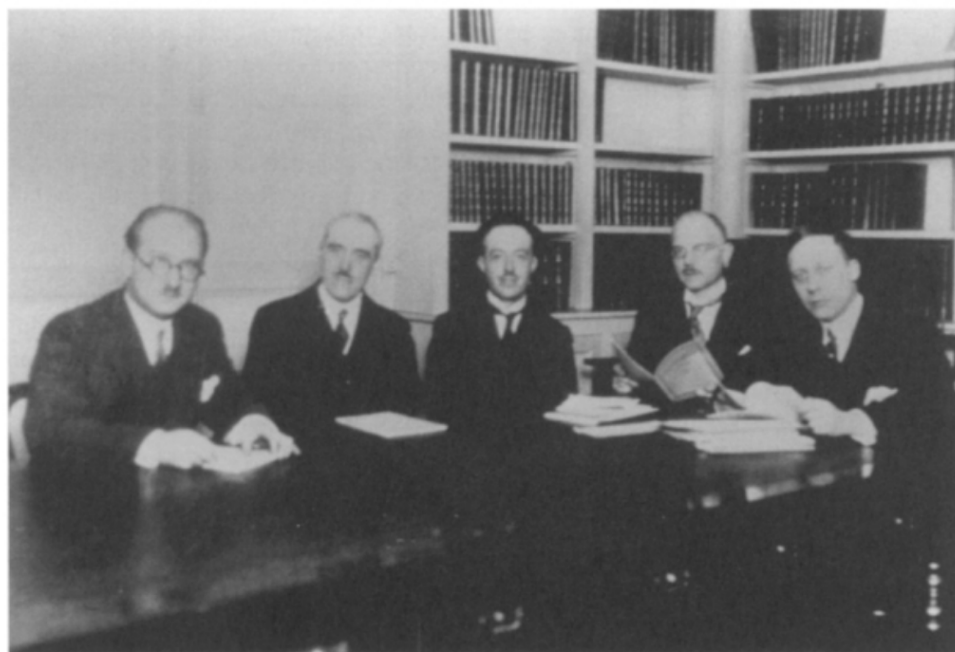


Figure 1 - Photographie prise vers 1925 dans la bibliothèque de Maurice de Broglie à Paris. De gauche à droite : Jean Thibaud, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Alexandre Dauvillier, Jean-Jacques Trillat. (Archives de l'Académie des Sciences, Paris).

Lors de sa nomination à Besançon en 1933, il apporte avec lui certains instruments mis au point dans le laboratoire de de Broglie et, en 1935, il équipe son laboratoire de sources et de spectromètres de diffraction à rayons X et des deux seuls appareils de diffraction électronique en France. Il en fait la publicité pour faire connaître l'existence de son laboratoire et recruter des doctorants dans la référence [8] : ce court article résonne encore en 2024 où les laboratoires français de province continuent de lutter pour leur visibilité à l'ombre des centres de recherche des grandes métropoles.

Trillat publie tout au long de sa carrière [9] sur les preuves expérimentales de la nature ondulatoire des électrons [10, 11] ou sur la relation entre la recherche fondamentale et l'industrie [12] mais le travail dans son laboratoire cesse au début de la Seconde Guerre mondiale [13] : tout son équipement est perdu dans un accident de la route alors qu'il était évacué par camion vers la Suisse en 1940 [14]. Après la guerre, Trillat est

détaché au CNRS pour y fonder et diriger un laboratoire sur la diffraction des électrons et en 1949 il est nommé à la Sorbonne. Il est élu à l'Académie des sciences en 1959 qu'il préside en 1974 tout comme l'Institut de France.

Dans un article de 1962 [3], Trillat explique la construction du premier microscope électronique français à Besançon en 1935 (figure 2). L'appareil est décrit comme « rudimentaire » [13], mais il est néanmoins capable de produire des images d'une cathode d'oxyde [15]. Trillat n'a jamais rien publié sur son microscope électronique, et la seule description contemporaine se trouve dans un article de son assistant Rémi Fritz (1902-2002) qui n'inclut malheureusement aucune micrographie produite par l'instrument [16]. Néanmoins, l'importance de cette contribution à la microscopie électronique est aujourd'hui largement reconnue [17-19].

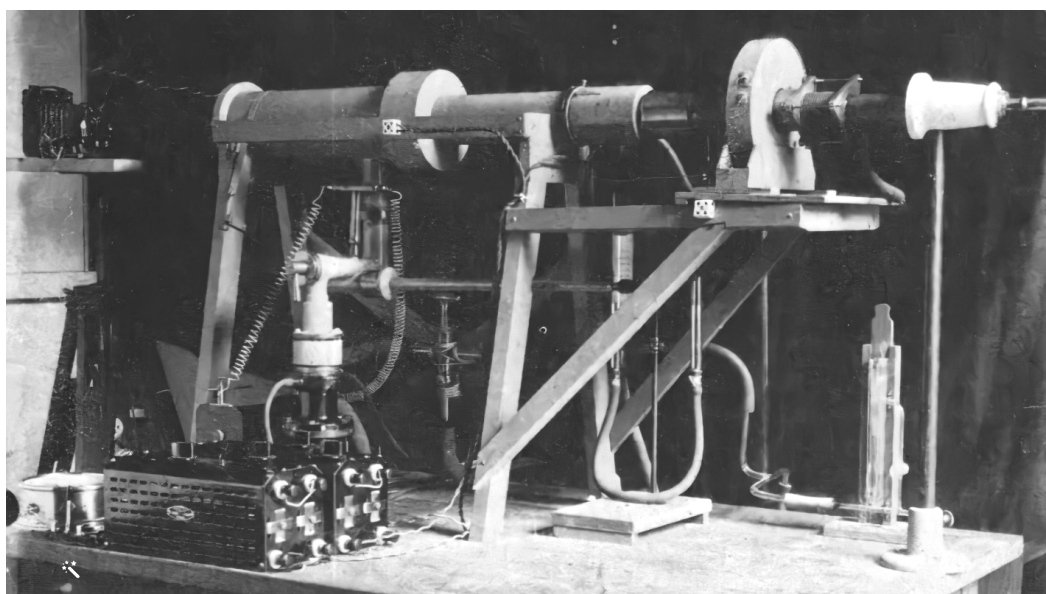


Figure 2 - Photographie donnée comme celle du premier microscope électronique français dans le laboratoire de Trillat à Besançon [13, 18].

Les collections de l'Université de Franche-Comté possèdent plusieurs pièces datant de l'époque de Trillat, notamment 3 tubes de Coolidge des années 1930 (Compagnie générale de radiologie, Paris), ainsi qu'un spectromètre à rayons X de 1931 (*Dr Müller's Improved X-ray Goniometer Spectrograph*, fabriqué par Adam Hilger Ltd, Londres). Il y a également en plus de quelques notes des plaques photographiques (6 cm x 13 cm et 9 cm x 12 cm) en verre (négatifs) montrant les résultats de diverses études de diffraction des rayons X entre 1924 et 1931, c'est-à-dire antérieure à l'arrivée de Trillat à Besançon. Sur l'une des boîtes, le nom « Broglie » et l'adresse de son second laboratoire à Paris au 12 rue Lord Byron est encore visible (voir figure 3).

2.2. Pierre Michel Duffieux (1891-1976)

Les mémoires personnelles de Duffieux [20, 21] et sa nécrologie par P. Mesnage [23] permettent de reconstruire aisément sa carrière. Entré en 1912 à l'École Normale Supérieure, ses études sont interrompues par la Première Guerre mondiale durant laquelle il sert comme sous-lieutenant, mais il est rapidement réformé pour maladie. Engagé volontaire dans les services auxiliaires à partir de 1916, il effectue des travaux scientifiques à Bordeaux avec Henri Bénard (1874-1939) et découvre la transformée de Fourier. Ses travaux de 1919 sur la conductivité thermique de matériaux isolants lui offrent en 1921 sa première publication [24].

Après la démobilisation, Duffieux obtient l'agrégation en 1920 et s'installe à Marseille pour travailler avec Charles Fabry (1867-1945). Il obtient son doctorat ès sciences physiques en 1926 [25, 26] pour ses travaux sur la spectroscopie de gaz excités et devient maître de conférences à la faculté des sciences de Rennes en 1927. En 1934, Fabry lui demande une méthode pour corriger les aberrations de son interféromètre, mais il ne comprend pas les mathématiques sous-jacentes à la solution proposée par Duffieux. Le mathématicien Jean Dieudonné (1906-1992) rappelle alors à Duffieux que son analyse est basée sur les méthodes de Fourier (qu'il avait oubliées depuis son séjour à Bordeaux [27]), et l'achat d'un analyseur harmonique Mader-Ott [28]

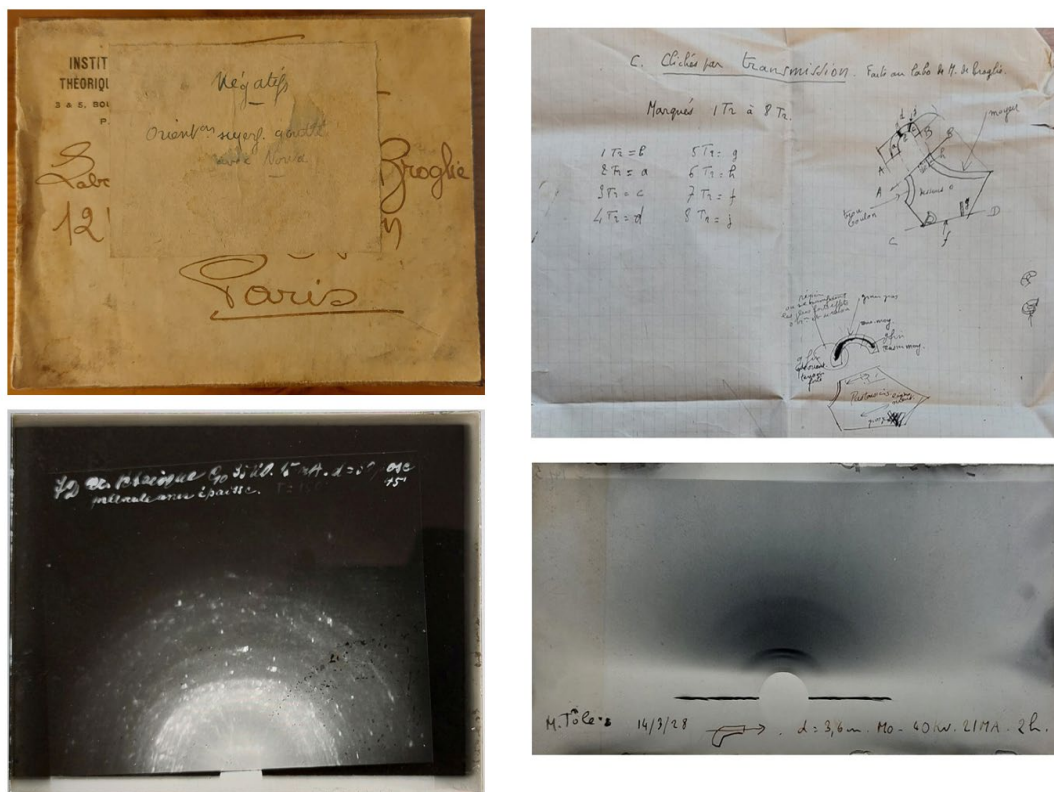


Figure 3 - Sélection de documents issus des archives de Trillat conservées à l'Université de Franche-Comté. En haut à gauche : boîte contenant des plaques photographiques de 9 cm x 12 cm, avec le nom et l'adresse du laboratoire de Broglie partiellement visibles. En haut à droite : notes sur la géométrie de transmission. En bas : deux exemples de plaques photographiques 9 cm x 12 cm et 6 cm x 13 cm.

(voir paragraphe suivant) lui fait comprendre qu'une approche dans le domaine des fréquences spatiales permet de décrire les systèmes optiques d'une manière entièrement nouvelle [20]. Duffieux développe ses idées dans une série d'articles publiés entre 1935 et 1940 [29-34] qui introduisent les concepts clés de ce que nous appelons aujourd'hui l'optique de Fourier. Son livre comprenant toutes les explications mathématiques nécessaires paraît en 1946 [35]. Duffieux est nommé professeur à Besançon en 1949 [36] mais, en ne publiant qu'en français, ses idées ont eu peu de visibilité internationale jusqu'en 1959, lorsque Born et Wolf soulignent son rôle pionnier [37]. La France lui accorde également une reconnaissance croissante [38] et son livre est réimprimé dans une deuxième édition corrigée en français [39], puis en japonais et en anglais en 1983 [40, 41]. La traduction anglaise avait surtout un intérêt historique [27, 42] car les techniques de Fourier étaient devenues courantes en physique depuis les années 1950 [43, 44] et un manuel sur l'optique de Fourier utilisant une terminologie plus récente avait été publié en anglais en 1968 [45].

Duffieux prend sa retraite en 1963 après avoir conçu à Besançon un nouveau laboratoire d'optique à l'environnement stabilisé. Ces nouvelles installations ont permis aux chercheurs bisontins de profiter de l'invention du laser en 1960 pour devenir l'un des premiers laboratoires français à étudier les lasers, l'optique cohérente, l'holographie... Un nouveau « Laboratoire d'Optique » est alors créé (administrativement distinct de la physique générale) et dirigé par son successeur, Jean-Charles Viénot. À la mort de Duffieux en 1976, plusieurs publications donnent un aperçu des recherches effectuées à Besançon dans les années 70 [46, 47] et pour souligner son héritage, le laboratoire d'optique portera son nom jusqu'en 2004 lorsqu'il devient le Département Optique, membre fondateur de l'Institut FEMTO-ST.

3. L'analyseur harmonique à engrenages de Mader-Ott dans l'enseignement

L'analyse de Fourier est un outil clé en physique et ingénierie, généralement abordée en Licence 3. Développée par Joseph Fourier au XIX^e siècle pour simplifier des problèmes physiques complexes liés aux signaux périodiques, la transformée de Fourier et ses coefficients restent parfois abstraits pour les étudiants. Des approches pédagogiques, notamment en optique de Fourier [48], ont été proposées pour faciliter leur compréhension. Nous avons ainsi permis à des étudiants de redécouvrir l'analyse de Fourier à travers une perspective historique en utilisant un analyseur harmonique de Mader-Ott [28, 49]. En quatre jours, ils ont réussi à le faire fonctionner, renforçant leur compréhension intuitive de la transformée de Fourier.

L'analyse de Fourier permet d'écrire une fonction ou un signal périodique $f(t)$ comme une somme de fonctions trigonométriques (les harmoniques) de fréquence multiple d'une pulsation fondamentale $\omega = \frac{2\pi}{p}$ avec p la période :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cos(\omega t) + b_n \sin(\omega t) \quad (1)$$

où $\frac{a_0}{2}$ correspond à la valeur moyenne de la fonction et les termes $a_n \cos(\omega t) + b_n \sin(\omega t)$ sont les harmoniques d'ordre n . On obtient la représentation spectrale de la fonction analysée en reportant en ordonnée l'amplitude des harmoniques (les termes $a_n, b_n \dots$) donnée par les expressions :

$$\begin{cases} a_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{p} \int_0^p f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (2)$$

Les coefficients de Fourier a_n et b_n d'une courbe quelconque peuvent être estimés grâce à un analyseur harmonique : en suivant la courbe à analyser avec une pointe, il construit une courbe auxiliaire fermée dont l'aire, proportionnelle aux coefficients de Fourier, est « intégrée » mécaniquement par un planimètre polaire². Après une procédure d'étalonnage du système, un jeu de roues dentées de différents diamètres permet de mesurer les différents coefficients de Fourier. Les analyseurs harmoniques mécaniques ont vu le jour vers 1920 et il en existe différentes versions [51] dont celui de l'ingénieur berlinois Mader [49] que nous présentons ici.

² Le planimètre polaire a été inventé en 1854 par le mathématicien suisse Jacob Amsler. Il est basé sur la formule de Green-Riemann [50]

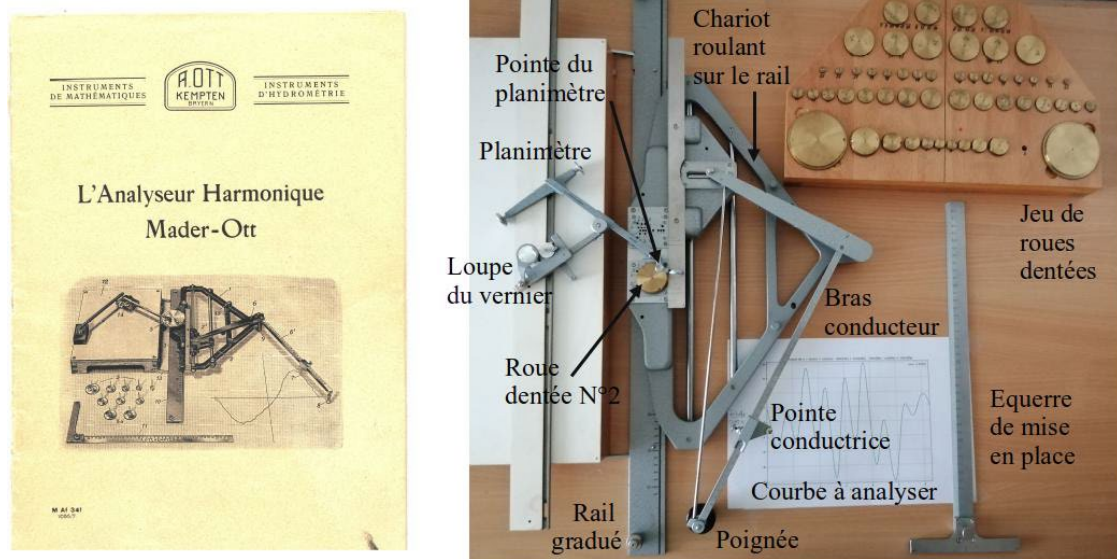


Figure 4 - À gauche : mode d'emploi de l'analyseur de Mader-Ott présent dans notre collection. À droite : analyseur complètement assemblé pour la mesure du coefficient de Fourier a_2 . Les principaux éléments du Mader-Ott sont spécifiés.

Nous avons proposé aux étudiants de master de retrouver à l'aide de notre analyseur de Mader-Ott les 9 premiers coefficients de Fourier a_n et b_n ($n \in [1,9]$) de la fonction périodique proposée dans le mode d'emploi du Mader-Ott et qui présente 4 harmoniques d'ordre 2, 3, 8 et 9 :

$$f(x) = \sin(x) + \cos(2x) - 3\sin(3x) + 2\cos(8x) - 3\sin(8x) - \cos(9x) + 2\sin(9x) \quad (3)$$

Par souci de concision, nous ne présentons pas ici les mesures obtenus mais nous avons pu confirmer les résultats antérieurs [28, 52] qui montraient que ces 9 coefficients peuvent être déterminés avec des erreurs inférieures à 8%.

Conclusion

Notre travail s'inscrit dans l'émergence d'une initiative nationale menée par la Société Française d'Optique visant à préserver le patrimoine immatériel de l'optique française. Les biographies présentées dans cet article illustrent les diverses contributions apportées par des personnalités majeures de la physique à Besançon au XX^e siècle. Elles montrent une riche tradition en physique à l'Université de Franche-Comté qui couvre des domaines thématiques importants, en particulier le domaine de la physique optique. Cependant, à notre grande surprise, en préparant cet article et en parlant avec plus de 40 membres retraités du personnel de l'université qui travaillaient dans les années 1950 et 1960, un seul d'entre eux avait connaissance d'un héritage antérieur à Pierre-Michel Duffieux.

L'enseignement de l'évolution historique d'une thématique est une partie importante de l'enseignement, et introduire une perspective historique locale ajoute une grande valeur aux activités pédagogiques. Nous envisageons ainsi dans le cadre d'un enseignement du traitement du signal de mettre en œuvre le planimètre et l'analyseur harmonique mécanique de Mader-Ott lors d'un TP et de comparer les résultats obtenus avec une analyse numérique (Matlab, python...). Si les étudiants peuvent trouver ces instruments fascinants et être motivés par le fait de travailler avec des instruments anciens qu'ils n'ont jamais vus auparavant, le but est surtout de rendre les concepts abstraits de l'analyse de Fourier plus tangibles et concrets. Cette perspective historique permet aussi aux étudiants de comprendre comment les méthodes ont évolué au fil du temps, passant des outils de calculs mécaniques aux outils numériques modernes alors que dans le même temps certaines activités de recherche du département Optique de l'Institut FEMTO-ST explorent comment de nouveaux procédés de calcul analogique en photonique pourraient constituer les solutions de demain pour réaliser des processeurs à très hautes performances [53, 54].

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (projets OPTIMAL ANR-20-CE30-0004 et HOLO-CONTROL ANR-21-CE42-0009) et par le programme français des Investissements d'Avenir, dans le cadre de l'École Doctorale de recherche transversale EIPHI (ANR-17-EURE-0002).

Bibliographie

- [1] L. Dordor, L. Froehly, J. Magnin, L. Vidal, J. Querenet, P. Verscheuren, M. Jacquot, J. Dudley, J. Salvi, « Enseignement et préservation du patrimoine scientifique à l'Université de Franche-Comté. Partie I : 1845-1930 », Bull. Un. Prof. Phys. Chim., à paraître, 2024.
- [2] J. Dudley, J. Magnin, L. Froehly, J. Salvi, P. Verschuere, et M. Jacquot, « Research and teaching in physics at the university of Franche-Comté 1845-1970 », arXiv preprint arXiv:2403.09271, 2024.
- [3] J.-J. Trillat, « Some Personal Reminiscences », P. P. Ewald (eds) *Fifty Years of X-Ray Diffraction. Springer, Boston*, 1962. D'abord publié pour International Union of Crystallography, N.V.A. Oosthoek's Uitgeversmaatschappij, Utrecht, The Netherlands, 1962.
- [4] N. Takahashi, « Jean Jacques TRILLAT (1899-1987) », J. Electron Microsc., vol. 37, p. 175-176, 1988.
- [5] L. Leprince-Ringuet, « La vie et l'œuvre de Jean-Jacques Trillat », C.R. Acad. Sci., n° 5, p. 473-477, 1988.
- [6] M. J. Nye, « Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: The De Broglies in Modern France », Isis n° 88, p. 397-421, 1997.
- [7] J.-J. Trillat, Rayons X et composés organiques à longue chaîne ; recherches spectrographiques sur leurs structures et leurs orientations, Masson, Paris (1926). J.-J. Trillat, « Rayons X et composés organiques à longue chaîne ; recherches spectrographiques sur leurs structures et leurs orientations. » Ann. Phys., p.105-101, 1926.
- [8] J.-J. Trillat, « Un nouveau laboratoire de recherches à la faculté de sciences de Besançon », *Revue Scientifique. Revue Rose Illustrée* n° 4, p. 109-112 (1935). [Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France.]
- [9] « Notice sur les titres et travaux scientifiques de Jean-Jacques Trillat ». Archives de l'Académie des Sciences, Paris, 1959-1979.
- [10] J.-J. Trillat, « Les Preuves Expérimentales de la Mécanique Ondulatoire : la diffraction des électrons et des particules matérielles ». *Actualités Scientifiques et Industrielles*, Hermann et Cie, Paris, 1934.
- [11] J.-J. Trillat, « Démonstration optique de la diffraction des électrons », *J. Phys. Radium*, vol. 10, p. 465-469, 1939.
- [12] J.-J. Trillat, « La coopération entre la science et l'industrie », *La Revue des deux mondes*, vol. 65, p. 235-244, 1941.
- [13] J.-J. Trillat, « The Start of Electron Diffraction in France: My Recollections », dans *Fifty Years of Electron Diffraction*, P. Goodman (Ed.) D. Reidel, Dordrecht, 1981.
- [14] J.-G. Théobald, « Phys'Bis'50. La physique à l'université de Besançon, il y a un demi-siècle », Procès-verbaux et mémoires, *Académie des sciences, belles lettres et arts de Besançon et de Franche-Comté*, vol. 200, p. 161-170, 2011.
- [15] P. Grivet, P. Hawkes. « The French electrostatic electron microscope (1941–1952) », *Adv. Imag. Elect. Phys.* (P. W. Hawkes, M. Hÿtch Eds), vol. 220, 369-419, Elsevier, 2021.
- [16] R. Fritz, « Le microscope électronique, principe, réalisation et emploi », *Rev. Gén. Sci. Pures Appl.* vol. 47, p. 338-342, 1936.
- [17] A. de Gramont, « Quarante ans d'optique Française », *La revue de deux mondes*, p. 186-193, 15 Septembre 1961.
- [18] P. W. Hawkes, « Trillat-Fritz: a very early electron microscope », *infocus Magazine (Royal Microscopical Society)*, vol. 31, p. 24-25, 2013.
- [19] J. van Gorkom, D. van Delft, T. van Helvoort, « The Early Electron Microscopes: A Critical Study »,

Adv. Imag. Elect. Phys., vol. 205, p. 1-137, 2018.

- [20] P.-M. Duffieux, *La part que j'ai prise à l'optique nouvelle*. Annales Scientifiques de l'Université de Besançon. Physique, fascicule 22, 3^e série, 1974
- [21] P.-M. Duffieux, « Comment j'ai pris contact avec la transformation de Fourier » dans P. Hawkes, N. Bonnet, « A symposium in honour of Pierre-Michel Duffieux », *Microsc. Microanal. M.*, vol. 8, ix-xiv, 1997.
- [23] P. Mesnage. « Pierre Michel Duffieux 21 février 1891-3 juin 1976 ». Extrait de l'Annuaire des Anciens Elèves de l'Ecole Normale Supérieure, 1977.
- [24] P.-M. Duffieux, « Mesures du coefficient de conductibilité thermique en valeur absolue de lièges granulés et agglomérés », *La Revue generale du froid et des industries frigorifiques sciences*, p.20-23, mars-avril-mai 1921.
- [25] P.-M. Duffieux, « Sur l'origine de quelques spectres de bandes », *Ann. Phys.-Paris*, vol. **10**, p. 249-318, 1925.
- [26] P.-M. Duffieux, « The Nature of Active Nitrogen », *Nature*, vol. 117, p. 302-303, 1926.
- [27] P. W. Hawkes, « Book Reviews. Fourier and Duffieux: a French connection », *Nature*, vol. 304, p. 283-284, 1983.
- [28] K. G. Hinzen, S. K. Reamer, F. Scherbaum, « Slow Fourier Transform », *Seismol. Res. Lett.*, vol. 84, p. 251-257, 2013.
- [29] P.-M. Duffieux, « Analyse harmonique des franges d'interférences données par les appareils à ondes multiples », *Bulletin de la société scientifique de Bretagne*, vol. XII, p. 125-130, 1935.
- [30] P.-M. Duffieux, « Analyse harmonique des franges d'interférences données par les appareils à ondes multiples », *Revue d'Optique*, vol. 18, p. 1-19, 1939.
- [31] P.-M. Duffieux, « Analyse harmonique des franges d'interférences données par les appareils à ondes multiples. Deuxième Partie », *Revue d'Optique*, vol. 18, 201-222, 1939.
- [32] P.-M. Duffieux, « Analyse harmonique des franges d'interférences données par les appareils à ondes multiples. Troisième Partie », *Revue d'Optique*, vol. 18, p. 2XX-282, 1939.
- [33] P.-M. Duffieux, Analyse harmonique des images optiques. I – Remarque sur le pouvoir de résolution. *Ann. Phys.-Paris*, vol. 11, n° 14, p. 302-338, 1940.
- [34] P.-M. Duffieux, « Analyse harmonique des images optiques. II – Période limite d'une pupille stigmatique quelconque », *Bulletin de la société scientifique de Bretagne*, vol. XVII, p. 107-114, 1940.
- [35] P.-M. Duffieux, *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Imprimeries Oberthur, Rennes, 1946.
- [36] Archives Nationales (France) F/17/28127 et F/17/16784.
- [37] M. Born et E. Wolf. *Principles of Optics*, 1^{ère} édition, 1959.
- [38] G. Amat, A. Arsac, J. Brochard, J. Brossel, P. Connes, L. Couture, P. Jacquinot, et A. Marechal, « Optics in France », *Appl. Opt.*, vol. 1, p. 260-278, 1962.
- [39] P.-M. Duffieux, *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Imprimeries Masson, Paris, 1970.
- [40] P.-M. Duffieux, フーリエ変換とその光学への応用, 共立出版, 1977.
- [41] P.-M. Duffieux, *The Fourier Transform and its Application to Optics*. Wiley, New York, 1983.
- [42] G. Harburn. Books. « The Fourier Transform and its Application to Optics. By P. M. Duffieux », *Appl. Opt.*, vol **23**, p. 1124-1125, 1984.
- [43] M. J. Lighthill, *An Introduction to Fourier Analysis and Generalised Functions*. Cambridge, New York, 1958.
- [44] A. Papoulis, *The Fourier Integral and its Applications*. Mc-Graw-Hill, 1962.
- [45] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. MacGraw-Hill, 1968.
- [46] « Special Issue dedicated to the memory of Professor P.M. Duffieux », *Opt. Acta*, vol. 24, p. 789-906, 1977.

- [47] A. Maréchal, « Pierre-Michel Duffieux », *Phys. Today*, vol. 29, n° 11, p.85, 1976.
- [48] J. Salvi, G. Fanjoux, A. Boetsch, R. Giust, « An undergraduate experiment to illustrate spatial transfer function concepts in Fourier optics », *Am. J. Phys.*, vol 88, n° 8, p. 617-624, 2020.
- [49] O. Mader, Ein einfacher harmonischer Analysator mit beliebiger Basis, *Elek. Zeit.*, 30, 847, 1909
- [50] B. Aebischer, « le planimètre polaire », IREM de Franche-Comté : philosophie et mathématiques, Besançon, 2014. https://lmb.univ-fcomte.fr/IMG/pdf/baebischer_explications-planimetre.pdf
- [51] F. Plantevin, « Des intégrateurs mécaniques à la prédiction des marées. Jean-Pierre Escofier, Gérard Hamon. *Actes de la Rencontre des IREM du Grand Ouest et de la réunion de la Commission Inter-IREM Epistémologie et Histoire des mathématiques*, IREM de Rennes, p. 129-144, 2009, 2-85728-073-4. _x005F_xffff_hal-04317855.
- [52] A. Korschunow, « On the reliability of harmonic analysis of seismograms », *Geophysical Prospecting*, vol. 4 (3), 303-309, 1956.
- [53] L. Larger, A. Baylón-Fuentes, R. Martinenghi, V.-S. Udaltsov, Y.K. Chembo, M. Jacquot, « High-speed photonic reservoir computing using a time-delay-based architecture: Million words per second classification », *Phys. Rev. X*, vol. 7(1), 011015, 2017.
- [54] Genty, G., Salmela, L., Dudley, J. M., Brunner, D., Kokhanovskiy, A., Kobtsev, S., & Turitsyn, S. K. (2021). Machine learning and applications in ultrafast photonics. *Nature Photonics*, 15(2), 91-101.

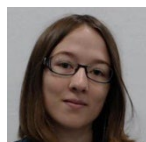
Cet article a été publié dans Le Bulletin de l'UdPPC, **119**, p. 899–911, novembre 2025.



Jérôme SALVI

Maître de Conférences

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174
Besançon (Doubs)



Jeanne MAGNIN

Chargée de projets médiation scientifique

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174
Besançon (Doubs)



Lucie VIDAL

Chargée de projets

Service sciences arts culture, Université de Franche-Comté
Besançon (Doubs)



Jeremy QUERENET

Directeur du service sciences, arts, culture

Université de Franche-Comté
Besançon (Doubs)



Luc FROEHLI

Chargé de Recherche au CNRS

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174
Besançon (Doubs)



John DUDLEY

Professeur

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174
Besançon (Doubs)



Maxime JACQUOT

Professeur

Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, CNRS UMR 6174
Besançon (Doubs)



Pierre VERSCHUEREN

Maître de Conférences

Université de Franche-Comté, Centre Lucien Febvre, EA 2273
Besançon (Doubs)