



Pour une histoire des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20ème siècle

Loïc Petitgirard

► To cite this version:

Loïc Petitgirard. Pour une histoire des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20ème siècle. Histoire et perspectives sur les mathématiques [math.HO]. Conservatoire national des arts et métiers, 2019. tel-03224396

HAL Id: tel-03224396

<https://theses.hal.science/tel-03224396>

Submitted on 11 May 2021

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.

Copyright

Conservatoire national des arts et métiers

Ecole doctorale Abbé Grégoire

Habilitation à diriger des recherches

Mémoire de synthèse des travaux de recherche et perspectives

Mémoire inédit : « Pour une histoire des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle »

Dossier présenté par Loïc PETITGIRARD, le 6 décembre 2019

Jury

M. **Thomas Archibald**, Professeur à la Simon Fraser University (*rapporteur*)

M. **David Aubin**, Professeur à l'Université Pierre-et-Marie-Curie (Paris 6) (*président*)

Mme **Muriel Guedj**, Maîtresse de conférences HDR à l'Université de Montpellier

M. **Marc Himbert**, Professeur du Cnam

M. **Jean-Claude Ruano-Borbalan**, Professeur du Cnam (*garant*)

Mme **Rossana Tazzioli**, Professeure à l'Université de Lille (*rapporteure*)

Mme **Renate Tobies**, Dr. Habilit. Université d'Iena

M. **Dominique Tournès**, Professeur à l'Université de la Réunion (*rapporteur*)

Mémoire de synthèse

Loïc PETITGIRARD

**Cnam - Laboratoire HT2S (Laboratoire « Histoire des Techno-
Sciences en Société » - Cnam– EA 3716)**

Partie 1 - Synthèse des travaux de recherche et perspectives

Partie 2 - Mémoire inédit : « Pour une histoire des rapports entre
savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle »

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Thomas Archibald, David Aubin, Muriel Guedj, Marc Himbert, Jean-Claude Ruano-Borbalan, Rossana Tazzioli, Renate Tobies et Dominique Tournès d'avoir accepté de participer à mon jury d'Habilitation à diriger des recherches.

Ce mémoire est le résultat de 15 ans de recherches, de rencontres, de pérégrinations dans l'enseignement supérieur et la recherche, avec deux Alma mater : l'Université Lyon 2, lieu de ma formation à la recherche, et le Conservatoire national des arts et métiers où se sont déployées mes travaux après ma thèse. Ma culture de la recherche historique a été forgée à Lyon auprès de Girolamo Ramunni, tristement décédé récemment. C'est avec Jean-Claude Ruano-Borbalan que j'ai pu trouver un second élan et ouvrir de nouveaux horizons de recherche. Je les remercie pour les échanges si nombreux et la confiance, indispensable, qu'ils ont placée en moi. J'ai pu en outre bénéficier d'un temps hors des contraintes habituelles de l'enseignement supérieur et de son administration grâce à un CRCT attribué par le Cnam. Le soutien de toute la direction de la recherche a beaucoup compté dans ce long processus. Je remercie tout particulièrement Clotilde Ferroud, Stéphane Lefebvre et Johanna Roux pour leur bienveillance et leur disponibilité.

Si mes travaux ont été fortement empreints d'histoire intellectuelle et conceptuelle à leurs débuts, la variété de mes axes de recherche a été le fruit de multiples collaborations. J'adresse des remerciements particuliers à quelques-un.e.s qui ont joué un rôle de phare, d'aiguillage et de meilleur conseiller. Mes remerciements vont bien sûr à Dominique Tournès et Marie-José Durand-Richard pour les nombreux échanges que nous avons eus depuis une fameuse exposition « Venez prendre l'aire ! » au Musée des arts et métiers. Peu après ma thèse, c'est Jean-Pierre Kahane, voyant loin et clair, qui m'avait indiqué le chemin de l'histoire de l'analyse harmonique. Ses encouragements m'ont marqué, j'espère avoir été à la hauteur de ses attentes.

Naturellement, toutes mes perspectives de recherche doivent beaucoup à mon inscription institutionnelle au Cnam qui m'a offert de nombreuses opportunités, impensables dans d'autres contextes. La laboratoire HT2S est devenu mon cocon et je dois beaucoup à tous ses membres : Jean-Claude, Camille, Michel et Robert ont été mes premiers soutiens, sans faille. Les relations construites en cet endroit avec André Grelon et Claudine Fontanon, avec Gilles Garel et Sylvain Lenfle sont exemplaires de collaborations scientifiques devenues amicales, toujours fructueuses et enrichissantes. L'armée des archivistes et bibliothécaires du Cnam a toujours répondu présent : le Cnum avec Florence Desnoyer, les personnels du PEB que j'ai souvent mobilisés, Lise Cloître qui connaît le moindre recoin des archives du Cnam. Et bien sûr les nombreux collègues du Musée avec qui j'ai pu construire des projets et tous ceux que j'ai sollicités un nombre incalculable de fois. Je ne peux pas les citer tous mais je leur adresse un grand merci !

Les soutiens et les attentions ont été nombreux, venus de tous les horizons. Ce manuscrit a indéniablement gagné en qualité grâce à la relecture minutieuse de Dominique Abry et les conseils circonstanciés de Bertrand Boquet. Un grand merci à ma « tribu », mes amie.s et mes parents, toujours présents, toujours attentionnés et bienveillants. Et je pense bien sûr à Séverine et nos trois « petits » qui ont suivi le rythme effréné, qui ont subi mes heures d'absence pour écriture, mais sont présents au quotidien avec leur sourire qui fait mon bonheur.

Table des matières

Introduction - Positionnement	7
A. En transversalité.....	7
B. Un perspectivisme assumé	8
C. Un contextualisme critique	9
D. Dans les « fabriques » de savoirs au 20 ^{ème} siècle.....	10
Partie 1	13
Synthèse des travaux de recherche et premières perspectives	13
I. Introduction	14
II. De l'histoire du concept de chaos aux instruments mathématiques (2001-2019).....	15
A. Un objet d'étude récent et des représentations en action	16
B. Le chaos : épistémologie et sociologie d'un champ de recherche émergent	18
C. Les pratiques scientifiques dans les sciences du non linéaire	21
D. Extensions et recherches en cours.....	24
III. Histoire des sciences, des techniques et valorisation du patrimoine : allers-retours (2005-2011)	26
A. Valorisation du patrimoine scientifique et technique : agir et réfléchir.....	26
B. Le patrimoine et la matérialité du monde numérique	27
C. Le patrimoine de l'instrumentation scientifique.....	29
IV. Histoire croisée de la métrologie nationale et du Cnam : acteurs, politique scientifique, institutions (2012-2015).....	29
A. Entrée dans l'histoire du Cnam : l'Institut national de métrologie	30
B. Les acteurs de l'Institut national de métrologie : exemple de la photométrie au Cnam	34
C. Développer un corpus numérique pour le Cnum.....	36
V. L'institutionnalisation de l'informatique au Cnam : machines, pratiques, discipline (2014-2019)	37
A. Le programme de recherche « Hist.Pat.Info.Cnam »	38
B. Le processus d'institutionnalisation de l'informatique au Cnam	40
VI. Recherche-action et innovation pédagogique (2005-2019).....	42
A. Dispositifs innovants pour la formation à la médiation culturelle des sciences et techniques – (2010-2017)	43

B. Le Mooc « Fabriquer l'innovation » (2016-2019) : entre histoire et gestion de l'innovation	44
C. Histoire(s) d'une expérience audiovisuelle pédagogique « TéléCnam » (2013-2019)...	46
VII. Bilan et perspectives.....	47
A. Approches biographiques et institutionnelles.....	48
B. Interdisciplinarité : histoire et gestion de l'innovation	50
Partie 2	52
Pour une histoire des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle. Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument.	52
I. Introduction - Enjeux historiographiques et épistémologiques	53
A. Instrumentation, matérialité et savoirs mathématiques	53
B. La catégorie des instruments mathématiques et ses limites	57
C. Les instruments mathématiques au 20 ^{ème} siècle	58
D. Artefact, Outil, Instrument et Instrumentation – Quelques définitions	62
E. Peut-on considérer les mathématiques « comme instrument » ?.....	65
F. Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument.....	67
II. La fabrique de la spectroscopie par transformée de Fourier (1949-1970)	73
A. Pourquoi s'intéresser à la spectroscopie infra-rouge par transformée de Fourier ?.....	73
B. 1949-1950 : repenser les spectromètres infra-rouge.....	77
C. Au Laboratoire Aimé Cotton – 1949-1965.....	84
D. Des instruments mathématiques du calcul de spectres	92
E. Hybridations informatiques.....	106
F. Le spectroscopie FTIR, un instrument de Fourier	116
III. La cristallographie par diffraction de rayons X et les « synthèses de Fourier » (1929-1960)	120
A. La « méthode des séries de Fourier »	121
B. La « fonction de Patterson », un instrument mathématique	125
C. Inventer de nouveaux instruments pour le calcul des synthèses de Fourier	126
D. L'essor du « calcul cristallographique »	139
E. Les instruments du calcul cristallographique, entre technologies analogiques et numériques	149
F. La transformée de Fourier de l'ADN	167
G. Qu'est-ce que le calcul cristallographique après 1960 ?	170

H.	Deux fabriques différentes d'instruments de Fourier.....	173
IV.	Pour une histoire des instruments de Fourier	177
A.	Quelques données quantitatives à propos du « retour » de Fourier.....	178
B.	Retour « à » Fourier	179
C.	Les mathématiques autour de Fourier au 19 ^{ème} siècle.....	181
D.	Kelvin, Rayleigh, Poincaré : l'analyse harmonique en physique au 19 ^{ème} siècle	182
E.	L'analyse harmonique pour l'ingénieur	185
F.	Les « analyseurs harmoniques » et la culture matérielle de l'analyse harmonique	189
G.	Les mathématiques de l'analyse harmonique après 1930	196
H.	L'émergence de l'optique de Fourier (1940-1960).....	204
I.	La « Fast Fourier Transform » : origines et dissémination.....	208
J.	Retour sur le « retour » de Fourier	216
V.	Les transformations électroniques de l'instrumentation dans les années 1970	219
A.	L'instrumentation et l'électronique dans les revues professionnelles	223
B.	Deux entreprises de l'instrumentation en France : Informatik et Intertechnique.....	227
C.	Le microprocesseur dans l'instrumentation : l'exemple de la conception du R2E-Micral.	231
D.	Claude Morillon : du Laboratoire Aimé Cotton à l'instrumentation numérique au Cnam	243
E.	Perspectives sur les transformations électroniques de l'instrumentation	250
VI.	Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument – Conclusions et perspectives.....	254
A.	Premier bilan historiographique et méthodologique	254
B.	Les instruments de l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires	261
C.	Sur quelques instruments mathématiques récents pour élaborer des savoirs mathématiques.....	266
D.	Les mathématiques comme instrument ?.....	274
	Bibliographie.....	283
	Annexes.....	310

Introduction - Positionnement

« Transversalité ». À l'évidence, ce terme caractérise ma pratique de la recherche en histoire des savoirs scientifiques et techniques. Il est en tout cas indicateur des traversées de frontières disciplinaires et méthodologiques qui ont émaillé mon parcours et m'ont accompagné d'un carrefour historiographique et épistémologique à un autre.

A. En transversalité

La première ligne académique traversée a été en quelque sorte le saut culturel vers la faculté d'histoire moderne et contemporaine de l'université Lyon 2, en 2001, après ma formation initiale en mathématiques et en sciences physiques. Au-delà de l'apprentissage de l'analyse socio-historique des sciences et techniques, ce temps a marqué mon acculturation aux sciences humaines et sociales, par une fréquentation tous azimuts de l'histoire urbaine, de l'histoire de l'art, de l'histoire des techniques et jusqu'à l'épistémologie de l'histoire. J'ai ensuite entamé mes travaux de thèse dans un contexte post-« guerre des sciences »¹, et durant lequel les mots clés, péjoratifs ou non, selon qui les prononçaient, étaient « relativisme », « rationalisme », « internalisme vs externalisme ». Ces deux termes sont un peu passés de mode, mais dénotent les tensions entre des catégories voulues orthogonales. Je me situais à la frontière, parfois pris à partie, dans une thèse sur la notion de « chaos » mêlant histoire intellectuelle, histoire sociale, histoire institutionnelle et épistémologie. Toujours est-il que choisir un « camp » n'avait pas de sens de mon point de vue, j'étais tout autant internaliste et externaliste, et c'était même une nécessité pour saisir la dynamique historique de la notion de chaos.

Mon entrée au Cnam en 2005 a conjugué la poursuite de ma trajectoire dans le monde académique avec la rencontre du monde des Musées, de la conservation du patrimoine scientifique et technique, jusqu'à la médiation culturelle. J'ai trouvé le confort d'un cadre institutionnel qui accueille tous ces champs professionnels avec une recherche académique adjacente, mais dont on ressent l'inconfort quand il faut en sortir pour se confronter aux cadres extérieurs plus rigides. L'établissement offre une conjonction et une articulation entre disciplines qui n'a pas beaucoup d'équivalent en France, car il propose un cadre très différent de la plupart des établissements de l'enseignement supérieur et de la recherche. C'est à l'image du double héritage interne au Cnam, mais en partie oublié, entre les travaux d'une histoire des techniques à la suite de Maurice Daumas (depuis les années 1950) et ceux de Jean-Jacques

¹ Voir (Debaz et Roux 2007; Sokal et Bricmont 1997; Jeanneret 1998). Ces « Science Wars » correspondent aux débats ouverts, à la fin de la décennie 1990, opposant socioconstructivistes (Bruno Latour en tête) et réalistes. Les débats ont été animés par l'ensemble des critiques émanant des sciences sociales interrogant la nature du savoir scientifique et la notion même d'objectivité – un socioconstructivisme, à la manière de Latour, soutenant que le savoir scientifique est produit socialement (donc contingent, faillible), s'opposant à des formes de réalistes prônant l'objectivité des faits et l'absence d'influence extrascientifique dans leur élaboration. Ces débats ont suscité de vives réactions de scientifiques, alimentées notamment par le physicien Alan Sokal, accusant le socioconstructivisme et le « post-modernisme » en général de relativisme et, en un mot, d'ennemi du progrès.

Salomon portés sur l'analyse des politiques de recherche scientifique et technique ; entre le « Centre d'histoire des techniques » fondé par Daumas et le centre « Science – technique - société » de Salomon, un des rares territoires précoces des *Science and Technology Studies* (STS) « à la française », dont l'histoire est en train d'être heureusement revisitée.

Le renouvellement de mes travaux de recherche post-doctorale a pris corps dans ce cadre institutionnel et lieu d'émergence des STS, qui est congruent à ma trajectoire de recherche pour au moins deux raisons.

La première tient au constructivisme sous-tendant les STS, parfois trop rapidement critiqué ou résumé en une forme de relativisme : c'est bien en dépassant systématiquement un réalisme trop strict que ce courant s'est imposé et qu'il trouve les faveurs du monde académique à l'échelle internationale². La seconde raison se trouve dans la transversalité du positionnement des STS, privilégiant à la fois une interdisciplinarité et une interméthodologie. Les recherches en STS sont pluridisciplinaires même si, d'un chercheur à l'autre, elles s'inscrivent souvent prioritairement dans un champ disciplinaire délimité que ce soit la sociologie, l'histoire ou l'anthropologie. En pratique, les STS appellent à des recherches véritablement interdisciplinaires : des croisements entre approches historiques et sociologiques, ce qui est le plus fréquent dans le champ, et des hybridations avec les sciences politiques, ce qui est devenu très courant aujourd'hui. À l'appui de ces croisements, les STS empruntent à des méthodologies élaborées, structurées dans chaque discipline et font un effort de mise en dialogue et de mise en cohérence de ces méthodes : c'est ce que j'entends par une interméthodologie. En revanche les STS ne s'imposent pas sur un corpus ni sur une méthodologie autonomisée de la rencontre des disciplines et il me semble difficile aujourd'hui de parler des STS en termes de transdisciplinarité ou de transméthodologie³.

B. Un perspectivisme assumé

Pour préciser mon positionnement transversal, je dirais qu'il s'est mué en un perspectivisme assumé : multiplier les perspectives et les éclairages sur un objet d'étude, ne pas limiter les regards possibles⁴. Ce perspectivisme est conjoint du constructivisme en un sens et si jamais l'analyse ne pourra être exhaustive et complète, elle s'enrichit des croisements de perspectives.

Avec et après mes travaux de thèse sur le chaos, ce perspectivisme ne s'est jamais démenti. Ma boîte à perspectives puise dans les différentes disciplines que j'ai mobilisées : épistémologie, histoire des sciences et techniques, sciences de l'information-communication, sciences de l'éducation, sciences de gestion et *design theory* pour mes recherches récentes. La synthèse de mes recherches rend compte de quelques-uns de ces croisements disciplinaires.

Il restera néanmoins toujours une perspective à part, celle offerte par l'histoire : point d'entrée dans les cas d'étude, matière pour nourrir les analyses et manière de synthétiser. Il est

² Pour des considérations plus détaillées sur les évolutions des STS, voir en particulier le *Handbook of science and technology studies* (Hackett et al. (eds.) 2008) et les ouvrages d'introduction du type (Pestre 2006; Sismondo 2010).

³ Sur le sujet inter/transdisciplinarité, voir les discussions dans (Hamel 1995; Resweber 2011).

⁴ Le perspectivisme est issu des doctrines philosophiques considérant que la réalité se compose de la somme des points de vue que nous avons sur elle. Ces théories sont anciennes, rejetant l'idée d'un possible accès humain à une réalité totalement objective, et qui ont été traduites en des termes très contemporains par Friedrich Nietzsche dans sa *Généalogie de la morale* : « Il n'existe qu'une vision perspective, une "connaissance" perspective ; et plus notre état affectif entre en jeu vis-à-vis d'une chose, plus nous avons d'yeux, d'yeux différents pour cette chose et plus sera complète notre "notion" de cette chose, notre "objectivité" ». (Nietzsche 1900, p. 206).

essentiel de s'appuyer sur la capacité de l'histoire à mettre en perspective dans le temps, par le temps⁵, ce qui explique mon centrage sur l'histoire des sciences et techniques. Or, un peu de la même manière que la physique a renoncé à une vision universalisante et globale des phénomènes, pour penser par modèles plutôt qu'en théories unifiées, l'analyse des savoirs par les sciences sociales s'est développée de plus en plus par « studies ». Et face à ce morcèlement, l'histoire garde cette ambition de produire une synthèse ou des synthèses⁶.

C. Un contextualisme critique

L'ancrage des situations historiques dans leur réalité sociale, dans leur contexte, est l'autre versant du travail quotidien de l'historien. En un sens l'histoire est un contextualisme⁷. Néanmoins, la notion même de contexte et le type d'explication en jeu posent question. L'historien Peter Galison en a fait une question essentielle dans son article « Ten problems in History and Philosophy of science »⁸ : « qu'est-ce qu'un contexte ? » et « qu'est-ce qu'un contexte peut expliquer » ? Ces interrogations peuvent sonner comme un écho au débat « internalisme vs externalisme » au sens où l'explication contextuelle serait à mettre en balance de l'explication causale. L'historiographie des sciences et techniques oscille entre deux tendances. Un contextualisme « fort » qui cherche une logique très rationnelle de la découverte et de l'invention dans leur contexte. Un contextualisme « faible » qui se suffirait d'explications par les moyens et les ressources disponibles aux acteurs dans une situation donnée.

Mon parcours m'a orienté vers un contextualisme critique et particulièrement sensibilisé aux difficultés d'une analyse contextualiste de la construction des savoirs mathématiques. La problématique avec les savoirs mathématiques renvoie à la tentation (platonicienne) d'ériger ces savoirs en des entités « a-historiques », signifiant par-là que leur contexte de genèse serait une variable très secondaire dans leur élaboration. Voilà qui ne cesse de poser question aux historiens des mathématiques, en charge de l'analyse généalogique des savoirs, laquelle serait « oubliable » pour beaucoup de mathématiciens, une fois le concept mathématique créé. La transposabilité des savoirs mathématiques d'une situation à une autre, ou encore la « déraisonnable efficacité » des mathématiques⁹ posent un problème à ce contextualisme. La question doit également être abordée au niveau des instruments : si on prend au sérieux le fait qu'ils embarquent des savoirs, le fait que les instruments puissent être élaborés dans un contexte donné et utilisés dans d'innombrables contextes différents, doit constituer une interrogation centrale de l'épistémologie des instruments. Ce sont des questions qui m'occupent aujourd'hui, à ce carrefour que je fréquente depuis plusieurs années, mais qui se renouvelle entre histoire

⁵ Cette mise en perspective est d'autant plus importante aujourd'hui face à la vitesse d'émergence et de propagation de notions et d'injonctions toutes faites, comme celles concernant l'« innovation » : un terme qui cache plusieurs concepts, saturé de sens différents, voulant imposer jusqu'à l'idée selon laquelle « nous n'avons jamais été aussi innovants ». Ou encore avec la question du « numérique ». Dans les deux cas, l'historien est sensibilisé à l'écrasement manifeste du temps et du travail nécessaire pour redonner à ces notions leur épaisseur historique.

⁶ À l'historien, ce point rappellera les débats sur « L'histoire en miettes », lancé par François Dosse en 1987 avec son ouvrage éponyme (Dosse 1987). Constatant qu'une histoire globalisante n'est plus possible, il reste « des histoires » à écrire. Cela n'enlève rien à l'ambition de l'histoire, depuis l'école des Annales, à produire des synthèses, empruntant d'abord aux analyses économiques, statistiques, géographiques jusqu'à l'ethnologie, la psychohistoire et finalement les sciences sociales dans toutes leurs dimensions.

⁷ Voir la *Stanford Encyclopedia of Philosophy* [URL : <https://plato.stanford.edu/entries/contextualism-epistemology/> consulté le 27 mars 2019]

⁸ (Galison 2008).

⁹ Référence au célèbre texte du physicien Eugene Wigner « The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences » - (Wigner 1960).

des savoirs mathématiques, de l'instrumentation, l'épistémologie et les STS. C'est ce qui structure le programme de recherches détaillé dans ce mémoire.

D. Dans les « fabriques » de savoirs au 20^{ème} siècle

Au-delà de la diversité des terrains de recherche que j'ai fréquentés et des méthodes mobilisées, se trouve la motivation essentielle qui est la mienne : analyser des « fabriques » de concepts et de savoirs scientifiques au 20^{ème} siècle. Le terme de fabrique est repris aujourd'hui dans de nombreux contextes, il est même déjà un peu galvaudé, à défaut d'être explicité par ceux qui l'utilisent, et il est polysémique. L'historien Simon Schaffer en a fait le titre de son ouvrage qui rassemble plusieurs de ses analyses de la « fabrique des sciences modernes »¹⁰. Mais concernant les sciences et techniques au 20^{ème} siècle, la notion de fabrique de savoirs prend un sens renouvelé à mes yeux : l'élaboration des savoirs contemporains a en effet fortement à voir avec des artefacts plus qu'avec la « nature ». La polysémie de la notion lui confère la vertu de pouvoir embrasser plusieurs perspectives dans un seul mouvement : la fabrique au sens du « lieu de fabrication » est aussi un « mode de fabrication ».

En termes de lieux de fabrication, le 20^{ème} siècle regorge de laboratoires de recherche, d'institutions académiques, d'industries, dont le nombre croît sans cesse, ou encore d'associations et autres « tiers-lieux » de la société civile (que les STS ont contribué à réhabiliter comme lieux d'élaboration de savoirs). La fabrique rassemble aussi des acteurs de la fabrication, qu'il s'agit d'analyser dans leurs individualités, par une approche biographique, et au travers de collectifs par une approche sociologique, prosopographique ou ethnographique, par exemple.

Les modes de fabrication renvoient à l'ensemble des méthodes et de l'organisation de la construction des savoirs, des artefacts, des concepts, incluant les épistémologies des acteurs. Au 20^{ème} siècle, ces fabriques ont pris un caractère « industriel », au sens d'une systématisation et d'une transformation profonde des modes de production, d'appropriation, de diffusion et de légitimation des savoirs. Au regard des recherches que je développe, cette fabrique mobilise enfin et surtout des outils et des instruments, ce qui constitue mon sujet d'analyse et d'intérêt majeur : la fabrique construit ses propres outils de fabrication, ses instruments d'analyse, les utilise, les transforme et les diffuse.

J'ai construit ma trajectoire de recherche en analysant, de manière évidemment partielle, plusieurs fabriques de savoirs, essentiellement au 20^{ème} siècle : la fabrique du « chaos » et des sciences du non linéaire, la fabrique de la « métrologie nationale » et la fabrique des instruments scientifiques, des instruments du calcul jusqu'aux systèmes informatiques.

Un premier point, qui peut paraître anecdotique mais qui a pris du sens dans ma manière d'aborder ces recherches, mérite d'être souligné : chacun de ces objets a un caractère transversal, à différentes échelles. Le « chaos » a émergé dans une convergence socio-disciplinaire, empruntant autant aux mathématiques qu'à des champs de sciences expérimentales étudiant des « phénomènes » chaotiques, en physique, chimie, biologie des populations, électrotechnique, etc. C'est une notion composite et transversale. La métrologie est un domaine socio-techno-scientifique dont l'histoire est très complexe, autant dans son versant « science de la mesure » que dans ses aspects de « métrologie légale » et son organisation internationale. Le 20^{ème} siècle a vu une extension considérable du domaine de la

¹⁰ (Schaffer 2014).

métrologie, aucun champ de l'activité socio-économique n'échappe vraiment à ses impératifs (mesurage, étalonnage et normalisation). Les principes, les méthodes et les instruments de la mesure sont, par constitution et par application, transverses. Quant à l'informatique, cette technologie est associée à un artefact matériel, l'ordinateur, devenu omniprésent aujourd'hui, et s'est construite à un carrefour disciplinaire : calcul scientifique, mathématiques et logique, électronique et automatique, traitement du signal... sans appartenir complètement à aucun de ces champs, et voulant au contraire construire sa légitimité, son autonomie et son horizon de développement en propre.

Le second point que je mettrai en avant est que ces analyses ont été, d'une certaine manière, des explorations de la fabrique des savoirs mathématiques et de l'instrumentation. Ce qui les qualifie en préliminaires à l'analyse des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle, cœur de la partie inédite de ce mémoire. Mais parler de fabrique des savoirs mathématiques, c'est déjà sous-entendre une position sur le sens et la valeur des savoirs mathématiques, position qui n'est pas consensuelle. Si les mathématiques s'imposent dans les esprits, et par l'activité des mathématiciens, comme un langage de l'abstraction d'une part et une science du raisonnement d'autre part, mon projet amène à une réhabilitation des fonctions instrumentales des mathématiques. Ces fonctions ont été fondamentales dans l'histoire séculaire de la constitution et l'utilisation des mathématiques, mais occultées par le courant des mathématiques voulues abstraites et formelles à tout prix au 20^{ème} siècle. Les mathématiques n'ont jamais quitté la sphère du monde matériel, elles ont investi tous les domaines de la conception matérielle, dans des fonctions multiples, à des degrés et des niveaux divers. Ce qui n'est pas neutre sur la nature des mathématiques, leur construction, leur diffusion. Cet angle d'analyse permet de reconsidérer les transformations des savoirs mathématiques, le rôle généralisé et diversifié de ces savoirs au 20^{ème} siècle.

Ces quelques mots introductifs fixent une ambition pour un mémoire qui a une double fonction. La première est de donner une vision synthétique de mes travaux de recherche et contributions à l'histoire des sciences et techniques contemporaines. Au-delà des nombreux terrains de recherche qui ont été les miens, il s'agira de faire ressortir les constantes et lignes de force principales de ma trajectoire de recherche jusqu'à aujourd'hui. L'analyse de l'élaboration des savoirs mathématiques en rapport avec les dispositifs matériels et les instruments constitue la première d'entre elles. Mais si elle est la principale, ce n'est pas la seule, nous le verrons.

La seconde fonction du mémoire est de tracer des perspectives de recherche, sous forme de renouvellement dans la continuité de mon parcours. Il s'agira alors de poser le cadre d'un programme de recherche de plus long terme, visant à analyser les rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle. Il est de nature à répondre à l'ambition évoquée précédemment, et articulera plusieurs problématiques sous-entendues dans le titre en trois termes : « Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument ».

De ces trois termes, le dernier est probablement le plus énigmatique pour le moment, le plus vertigineux aussi, évoquant les fonctions instrumentales des mathématiques dans une formule condensée. Avant d'entrer dans les détails du mémoire et la discussion de ces termes, je laisserais le dernier mot d'introduction à George Orwell, pour prendre de la distance à la fois

sur cette dimension instrumentale des mathématiques et sur les limites, ou dérives, des perspectives constructivistes sur les savoirs.

Le grand roman d'Orwell, *1984*, se prête évidemment à de nombreuses interprétations. Il entre en résonance avec le monde actuel, chacun trouvera un écho à Big Brother, son réseau de Telescreen et son Newspeak, dans une œuvre profondément contemporaine. Mais la mécanique orwellienne est aussi une forme de mise en garde sur un dévoiement possible du constructivisme. Sa démonstration se construit autour d'une proposition qui suit le narrateur, Winston Smith, au fil de l'histoire : « $2+2=5$ ». Dans son monologue intérieur Winston Smith en vient à penser :

*In the end the Party would announce that two and two made five, and you would have to believe it. It was inevitable that they should make that claim sooner or later: the logic of their position demanded it. Not merely the validity of experience, but the very existence of external reality, was tacitly denied by their philosophy. The heresy of heresies was common sense. And what was terrifying was not that they would kill you for thinking otherwise, but that they might be right. For, after all, how do we know that two and two make four? Or that the force of gravity works? Or that the past is unchangeable? If both the past and the external world exist only in the mind, and if the mind itself is controllable what then ?*¹¹

Le cœur du travail de rééducation auquel est soumis Winston Smith est un retour systématique à cette proposition « $2+2=5$ ». Le processus de rééducation est une suite de propositions, de dissonances cognitives comme celle-ci, qui s'accumulent pour fabriquer des savoirs alternatifs et deviennent un moyen de contrôler les modes de pensée. Les mathématiques sont, en quelque sorte, considérées comme le plus fondamental de ces modes de pensée, c'est celui qu'il faut rééduquer en priorité : les mathématiques sont tout à la fois instrument de rééducation, de contrôle et d'évaluation de la réussite du processus totalitaire. *In fine*, Winston Smith y viendra :

*Almost unconsciously he traced with his finger in the dust on the table: $2+2=5$.*¹²

¹¹ (Orwell 1948, p. 59).

¹² (*Ibid.*, p. 219)

Partie 1

Synthèse des travaux de recherche et premières perspectives

I. Introduction

Même si mes recherches se sont beaucoup diversifiées depuis 2005, ma trajectoire n'échappe pas au fait que le doctorat oriente sur le long terme un itinéraire scientifique et académique. Dans un premier temps je reconsidérerai donc ces travaux doctoraux, pour souligner les options méthodologiques et les choix épistémologiques qui ont constitué un sous-bassement à mes recherches ultérieures. Ma thèse, réalisée entre 2001 et 2004, a constitué une contribution à l'analyse socio-historique et épistémologique d'un concept scientifique, le chaos. Partant d'une histoire des idées, des concepts scientifiques, nourrie d'histoire des mathématiques, j'ai écrit une histoire qui donne à voir plusieurs perspectives : l'élaboration des concepts et des savoirs liés aux théories du chaos, la sociologie de ce champ de recherche contemporain (sur la période 1975-82), les modes d'institutionnalisation et les pratiques, notamment instrumentales, qui ont contribué, au même titre que les savoirs théoriques, à l'histoire du chaos et des sciences du non linéaire.

Par mon insertion institutionnelle au Cnam, en 2005, et les activités qui étaient associées à mon poste de maître de conférences, je me suis engagé après mon doctorat dans une phase de projets culturels et d'expositions muséographiques, de découverte du monde des Musées, en parallèle de la définition d'enseignements et d'une filière de formation complète au croisement des *Science and technology studies*, de la médiation culturelle et du patrimoine. Avec le recul, ces projets ont orienté mon parcours beaucoup plus que je ne l'imaginais : des expositions comme celle sur les « Instruments du calcul savant » (2007) jusqu'au Mooc « Fabriquer l'innovation » (depuis 2017), ils ont généré de nombreuses pistes de travail en histoire des sciences et techniques, ont nourri des croisements disciplinaires. Leur catégorisation est en soi problématique, nous le verrons, mais j'en retire que l'action sur le terrain de la médiation et du patrimoine scientifique et technique a été un carburant pour mes recherches. Les collections du Musée, qui s'imposaient en effet comme support de médiation et outil pédagogique, ont été progressivement intégrées dans mes recherches : comme sujet de recherche, en travaillant sur l'histoire des instruments scientifiques ; puis à une toute autre échelle, en travaillant sur l'histoire du Cnam dans sa globalité et sa longue durée.

La volonté de développer le versant de mes recherches institutionnelles, et la rencontre avec les animateurs de la recherche sur l'histoire du Cnam en 2012, m'ont permis d'engager un renouvellement de mes perspectives historiographiques. Investi dans le chantier historiographique du Cnam dans les Trente Glorieuses, j'ai contribué à une histoire croisée du Cnam et de la métrologie. Il en a découlé une implication sur les différents projets associés : séminaires sur l'histoire du Cnam, projet de *Dictionnaire des professeurs du Cnam* (volume sur la période 1945-75) et relance des *Cahiers d'histoire du Cnam*.

Parallèlement, depuis 2012, les évolutions institutionnelles au sein du Cnam, la restructuration du CDHTE en laboratoire HT2S¹³, ont transformé mon horizon de recherche,

¹³ Le Centre d'histoire des techniques et de l'environnement (CDHTE), fondé par Maurice Daumas au Cnam, a été restructuré en 2012 et transformé en Laboratoire d'Histoire des technosciences en société (HT2S) – intégrant les traditions de recherche en histoire des techniques et les perspectives socio-historiques sur les sciences et technologies (héritées du Centre « Science -Technique – Société » créé par Jean-Jacques Salomon au Cnam).

dans un renouvellement plus global des pratiques et des problématiques de recherche. D'un projet questionnant les modes de légitimation du savoir, au sein du laboratoire HT2S, nous avons pu élaborer un programme de recherche portant sur la genèse du laboratoire d'informatique du Cnam.

Cette synthèse n'a pas pour vocation à être un simple jeu rhétorique *a posteriori* visant à construire une cohérence totale de mon itinéraire de recherche. Néanmoins plusieurs constantes traversent mes travaux, c'est ce que j'estime devoir faire ressortir de cette synthèse, pour permettre une capitalisation sur des lignes de force et un renouvellement de perspectives de recherche, dans une certaine continuité.

La première ligne de force, axe principal de mes recherches, tient aux analyses des savoirs mathématiques et à l'histoire matérielle de l'instrumentation. Elle correspond à une longue évolution de ma trajectoire de recherche depuis ma thèse, qui m'a conduit de l'histoire conceptuelle à l'épistémologie des instruments mathématiques. Cette ligne de force s'est enrichie de la fréquentation du Musée du Cnam et ses collections d'instruments, lieu de conservation des cultures matérielles de l'instrumentation. Les parties II et III de cette synthèse montrent mon évolution thématique progressive vers l'analyse des rapports entre mathématiques et instrumentation, qui structure un programme de recherche au long cours, détaillé dans la partie inédite de ce mémoire.

Au fil de ces premières parties, il devrait apparaître que les échelles d'analyse conceptuelle, institutionnelle et biographique s'entrelacent dans tous mes travaux. C'est particulièrement caractéristique de ma deuxième ligne de recherche, avec les travaux sur l'histoire du Cnam. Dans la partie IV, je présenterai les travaux sur l'histoire croisée de la métrologie nationale et du Cnam, puis l'histoire de l'informatique au Cnam (partie V), en détaillant les évolutions et les fruits de ces collaborations de recherche. Ils seront ensuite mis en perspective avec les projets de *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* et des *Cahiers d'histoire du Cnam* devenus des outils d'animation des recherches sur le sujet.

Un troisième et dernier axe de recherche se développe au carrefour de l'histoire des sciences et techniques, des STS, de la médiation culturelle des sciences et techniques et de la formation sur ces questions au sein du Cnam. La partie VI présente mes démarches de recherche-action, conjugaison de conception et de réflexivité sur les dispositifs de formation pédagogique à l'interface entre science, technique et société. Leur présentation veillera à préciser en quoi ces travaux rencontrent les axes précédents et contribuent à mes perspectives de recherches.

II. De l'histoire du concept de chaos aux instruments mathématiques (2001-2019)

Après ma formation initiale en mathématiques et en sciences physiques à l'École normale supérieure de Lyon, j'ai eu l'opportunité de réaliser un DEA en histoire contemporaine à la Faculté d'histoire moderne et contemporaine de l'Université de Lyon 2 en 2000, sous la direction de Girolamo Ramunni. Ce DEA a pris la forme d'une année de découverte accélérée de l'écriture de l'histoire contemporaine, année de formation à la problématisation en histoire, au travail en archives et d'acculturation aux sciences humaines et sociales. S'en est suivi l'entrée en thèse de doctorat en 2001, sur le sujet de l'histoire du concept scientifique de chaos. Le sujet était alors une sorte de dénominateur commun entre mon intérêt pour l'histoire des

mathématiques (même si cette vision était quelque peu naïve et empreinte d'une agrégation en mathématiques récente !), l'épistémologie des concepts scientifiques et la sociologie d'une science en train de se faire.

Mes recherches en thèse ont été traversées par plusieurs questions : qu'est-ce que le chaos ? De quoi l'émergence d'une notion aussi protéiforme est-elle le signe ? Qu'est-ce que ce concept et les théories du chaos, dans leur pluralité, nous donnent à voir des transformations récentes des sciences et techniques ? En termes actuels, il s'agissait d'analyser la fabrique de la notion de chaos pour elle-même et dans ce qu'elle a de révélatrice de la fabrique des sciences et techniques contemporaines. Le titre complet donné à la thèse « Le chaos : des questions théoriques aux enjeux sociaux (1880-2000). Philosophie, épistémologie, histoire et impact sur les institutions »¹⁴ indique l'ambition d'une histoire mêlant l'analyse des concepts et des pratiques à une perspective institutionnelle.

Avant de rappeler les conclusions et les prolongements de ces travaux, il me semble utile de souligner les difficultés que pouvait susciter un tel projet de recherche entamé en 2001, d'autant plus qu'elles se sont avérées récurrentes dans les chantiers de recherche que j'ai conduits ultérieurement.

A. Un objet d'étude récent et des représentations en action

En premier lieu, le sujet n'avait été défriché que par de trop rares historiens, dont David Aubin et Amy Dahan qui avaient pu écrire la première véritable trame d'une histoire du chaos en longue durée¹⁵. Sara Franceschelli avait analysé, dans une perspective plus anthropologique, les pratiques et gestes de physiciens d'un groupe spécialisé dans la turbulence et le chaos, au tournant de 1980¹⁶. Autant d'éclairages importants pointant les articulations clés de cette histoire.

1. Des représentations collectives

À côté de ces travaux d'historiens, de nombreuses histoires du chaos avaient été écrites soit par des journalistes-vulgarisateurs, soit par les acteurs de cette histoire, en particulier ceux qui ont animé l'épisode de définition d'un « chaos déterministe » et des théories attenantes, dans les années 1970-1980¹⁷. Dans les représentations collectives les plus prégnantes de cette histoire, la notion de chaos avait des atours de « révolution scientifique ». La formule est propre à attirer toute la méfiance des historiens en même temps qu'elle est annonciatrice de dialogues complexes avec les acteurs, leurs représentations et leur mémoire. Le travail de l'historien du contemporain débute autant par une analyse de l'état historiographique du sujet que par la déconstruction des représentations élaborées par les acteurs d'une histoire très récente. La difficulté est doublée par le fait que les acteurs sont précisément les détenteurs d'une mémoire à recueillir, à enregistrer, pour constituer des archives orales.

¹⁴ (Petitgirard 2004).

¹⁵ (Aubin et Dahan 2002) qui fait suite à l'ouvrage « Chaos et déterminisme » (Dahan, Chabert et Chemla (eds.) 1992) et aux travaux de doctorat de D. Aubin en 1998 « A Cultural History of Catastrophes and Chaos: around the "Institut des Hautes Études Scientifiques", France » (Aubin 1998).

¹⁶ « Construction de signification physique dans le métier de physicien: Le cas du chaos déterministe » (Franceschelli 2001).

¹⁷ Les plus connus sont alors (Gleick 1989; Stewart 1989; Lorenz 1993; Ueda, Abraham et Stewart 1992).

Au fil de mon enquête, en 2001-2004, j'ai été immergé dans la communauté des acteurs du chaos, sur laquelle j'ai mené une courte enquête sociologique. Elle m'a permis de saisir à quel point elle était structurée et en phase de légitimation croissante dans un paysage scientifique où les notions de chaos s'associent à celles de la complexité, de l'émergence, du non linéaire, portées par une épistémologie voulue interdisciplinaire. Dans ce milieu et à ce moment-là, les récits et les représentations collectives agissent comme adjuvant de la communauté.

Ce sont évidemment des préoccupations pour tout historien du « très » contemporain, immergé parmi les acteurs, qui veille à être doublement prudent pour ne pas sous-estimer la force de l'épistémologie spontanée des chercheurs (acteurs de cette histoire) et ne pas négliger le poids de leur perception de l'histoire comme force de légitimation de leurs conceptions et de leur fonction sociale. Ces forces sont d'autant plus importantes que la trajectoire de l'acteur a été marquée par des batailles épistémologiques, méthodologiques, académiques, politiques, etc. Entre 2001 et 2004, il s'agissait donc de dialoguer avec des « révolutionnaires », tout en signifiant mon scepticisme quant à leurs catégories et représentations.

2. À travers les frontières

La fréquentation de l'histoire du concept de chaos laisse apparaître assez vite qu'il n'existe pas une mais des notions de chaos, émergentes et co-existantes dans les années 1970, avant qu'un tri ne s'opère. Le concept évolue, il est très hybride et nourri de plusieurs traditions de recherche : mathématiques des systèmes dynamiques, physique statistique, théorie des oscillations non linéaires, dynamique des populations, chimie des oscillations... cette liste n'étant pas exhaustive. Néanmoins, pour nombre de mathématiciens, l'histoire du chaos ne devait être fondamentalement qu'une généalogie de concepts mathématiques, relayant au second plan (voire même excluant et délégitimant) les travaux des physiciens, biologistes, ingénieurs, etc. Ce qui a des réciproques, puisque selon ces derniers, les mathématiciens n'auraient apporté qu'une couche supplémentaire de théorie à des phénomènes étudiés, compris, théorisés par des physiciens et des « non mathématiciens ». Ces effets d'appropriation de l'histoire sont doublés d'un implicite : celui d'une survalorisation des théories mathématiques par rapport aux travaux des sciences perçues comme plus empiriques. Cela ne surprend pas en contexte français, héritant d'un positivisme qui n'a pas totalement disparu, mais les effets dépassent largement ce contexte¹⁸.

La charge de ces représentations m'a poussé à une analyse de la genèse du concept en transversalité, par-delà les frontières des domaines académiques et des épistémologies. L'analyse a été appuyée par une extension des frontières pour prendre pleinement en considération les acteurs perçus comme auxiliaires parce que plus éloignés de l'élaboration des concepts mathématiques liés au chaos. J'ai pu retrouver tous ces effets dans les recherches sur l'histoire de l'informatique, dont on discutera plus avant, où la friction avec les mathématiques a constitué un long épisode de la construction de la discipline informatique, vécue ainsi comme une véritable bataille par les acteurs.

¹⁸ Les ouvrages mentionnés précédemment, en particulier les premiers publiés sur le sujet, ont privilégié la perspective historiographique reposant sur la généalogie des conceptions mathématiques du chaos, qu'ils soient édités en contexte « français » comme (Dahan, Chabert et Chemla (eds.) 1992), britannique (Stewart 1989) ou très international (Ueda, Abraham et Stewart 1992).

3. Archives et acteurs

Au fil de mes travaux de thèse, j'ai construit un corpus très composite mais somme toute classique : une base de travail à partir des productions scientifiques elles-mêmes (articles, thèses, rapports de recherche), des archives de laboratoires et institutions, des archives orales enregistrant des entretiens avec les acteurs vivants. Étant donné la technicité du sujet, je me suis adossé ponctuellement à des informateurs privilégiés, spécialistes du chaos. Le recours à cette expertise est évidemment problématique.

À partir de là, il convient de souligner qu'une formation initiale en mathématique et physique est un atout critique – ce qui constitue un point de désaccord entre internalistes et externalistes, qui considéreraient plutôt que la distance avec la technicité propre aux discours des acteurs est un gage de distance critique. Quelle que soit la posture, elle est biaisée, mais un « doute méthodologique » permet de la corriger. Et le premier de mes doutes tenait alors à mes interrogations quant aux réussites beaucoup trop nombreuses qui se dégagent des multiples récits déjà élaborés : où sont les impasses, les échecs, les oublis ? Et quels sont les acteurs oubliés de ces récits, volontairement occultés ou considérés comme secondaires ? Ces doutes ont nourri la nécessité d'élaborer un corpus susceptible de rendre compte de ces pans occultés.

Écrire l'histoire du chaos m'a conduit à porter mon analyse à la fois sur les efforts de mathématisation du chaos et sur les pratiques des acteurs, sur les savoirs mathématiques en jeu et sur les savoir-faire techniques, sur les processus d'abstraction et les opérations avec des instruments, souvent très prosaïquement calculatoires. Dans l'analyse, comme dans la constitution du corpus, la difficulté du projet tenait à la tentative de conciliation des ordres d'analyse conceptuels et institutionnels, pour écrire une histoire attentive à toutes ces échelles. Car si une « révolution scientifique » a été claiornée, ce n'est pas uniquement pour la beauté du concept de chaos, mais bien une tentative de l'établir en discipline, en position académique légitime dans le champ scientifique. Avec le recul historique, la légitimité a été acquise facilement après un « effet de mode » observable sur la thématique du chaos dans les années 1980-90. Aujourd'hui les recherches sur le chaos sont immergées dans les sciences de la complexité, comme un sujet parmi d'autres.

B. Le chaos : épistémologie et sociologie d'un champ de recherche émergent

1. Microsociologie d'un champ de recherche (1975-1982)

Dans une perspective d'histoire intellectuelle et sociale une grande partie de mon attention s'est portée sur la microsociologie de la communauté scientifique qui a élaboré entre 1975 et 1982 plusieurs notions de chaos et formulé des « scénarios de transition vers le chaos ». D'une part la grande flexibilité interprétative qui prévaut à cette période dans l'élaboration des concepts de chaos, d'autre part les mécanismes sociaux qui sont en jeu, entre acteurs mais aussi entre disciplines, invitent¹⁹ à croiser une analyse qualitative et quantitative des productions scientifiques (articles, ouvrages, et leurs références croisées, dans une perspective bibliométrique), des trajectoires des acteurs, des moments fédérateurs (conférences, colloques, ateliers)²⁰. Cette communauté est en fait très dispersée, produit de multiples convergences

¹⁹ Ces traits caractéristiques en font un sujet et une période propice à une analyse selon les canons de la *Sociology of scientific knowledge* (Barnes, Bloor et Henry 1996; Latour et Woolgar 1988; Pickering (ed.) 1992).

²⁰ Chapitres 3, 4 et 5 dans (Petitgirard 2004).

socio-disciplinaires et échafaude un programme de recherches pour une théorie du chaos, stabilisé vers 1982, qui servira de canevas pour la décennie suivante.

La trame conceptuelle des notions de chaos s'articule alors sur les questions d'instabilité et d'ergodicité, les notions de « sensibilité aux conditions initiales » et d'« attracteur étrange ». Dans ce moment de créativité scientifique intense, il existe en réalité une grande variété technique : des travaux à la convergence de la dynamique des populations et des systèmes dynamiques (Robert May qui parmi les premiers amène le terme « chaos » dans le champ de ses recherches dès 1974) aux recherches sur les itérations en mathématiques (avec le célèbre résultat de Li et Yorke en 1975, qui met en avant une notion de chaos pour les systèmes « discrets »), en passant par les travaux de David Ruelle, le physicien-mathématicien qui promeut la notion d'attracteur étrange. Plusieurs concepts clés s'imposent et prédomineront à la faveur de l'élaboration des « scénarios de transition vers le chaos ». Mais il existe des subtilités entre différentes notions de chaos, qu'il est possible d'élucider à travers au moins deux séries de travaux, d'Otto Rössler (biochimiste) et de Robert Shaw (physicien)²¹. Leurs parcours biographiques éclairent leurs résultats concernant les mécanismes générateurs de phénomènes de chaos, qui sont inspirés de travaux en électronique et en biochimie d'une part (Rössler qui fera ensuite une analyse approfondie des dynamiques chaotiques) et par les théories de l'information d'autre part (Shaw, en partisan d'une physique de la dynamique).

2. Y a-t-il une origine aux notions de chaos ?

Une deuxième partie de mes travaux de thèse interrogeait les racines scientifiques et techniques profondes de ces notions de chaos²². La dynamique du champ de recherche à partir de 1975 est un écho concret à des problématiques esquissées dès la fin du 19^{ème} siècle au sein d'une communauté scientifique alors imprégnée de débats philosophiques relatifs au hasard, au déterminisme et à l'instabilité. La mécanique céleste trouve une nouvelle voie analytique avec les « Méthodes nouvelles de la mécanique céleste » d'Henri Poincaré²³ proposant une approche plus géométrique et topologique de la dynamique. Sa démonstration sur les difficultés et solutions particulières du problème des trois corps a marqué les esprits d'autant plus qu'il représente l'archétype de ces problèmes à la fois simples dans la manière dont ils sont posés mathématiquement, et complexes dans leur résolution. Après les solutions partielles, approchées numériquement, qui émaillent le 19^{ème} siècle, Poincaré construit un cadre mathématique renouvelé qui orientera l'étude des systèmes dynamiques au 20^{ème} siècle : l'architecture mathématique du chaos en est un héritage, perpétué et renouvelé par des mathématiciens de premier plan (D. Birkhoff, S. Smale, R. Thom pour ne citer qu'eux). L'histoire mathématique du chaos en est le pendant historiographique.

Dans le même contexte naît la mécanique statistique, associée aux noms de James C. Maxwell et Ludwig Boltzmann. Les débats sur l'atomisme en sont une toile de fond, la thermodynamique propulsée au milieu du 19^{ème} siècle bouscule les concepts de la mécanique. Il en est resté une question centrale, en forme de paradoxe : la mécanique des atomes, au niveau microscopique, peut-elle s'accorder avec le second principe de la thermodynamique et l'irréversibilité observée à l'échelle macroscopique ? Comment concilier un principe de

²¹ Points 4.1 et 4.3 du chapitre 4 dans (*Ibid.*).

²² Chapitre 6 et 7 (appuyés par les analyses produites dans le chapitre 1) (*Ibid.*).

²³ Ces travaux ont fait l'objet d'une multitude d'analyses, la meilleure synthèse étant probablement (Barrow-Green 1997).

conservation de l'énergie avec un principe de dissipation d'entropie et d'évolution irréversible ? Ces problèmes de l'ordre des mathématiques et de la physique, entre mécanisme et physique statistique, s'entrecroisent avec les débats épistémologiques et philosophiques au sujet du hasard et du déterminisme. Au 20^{ème} siècle, l'entrelacement des théories des systèmes dynamiques et de la physique statistique sera fécond pour le renouvellement des théories de la turbulence et l'émergence des notions d'ergodicité et de stochasticité. Toutes ces notions nourrissent les conceptions du chaos dans les années 1970.

Dans cette préhistoire du chaos, H. Poincaré occupe une place de premier ordre, au croisement des mathématiques (des équations différentielles, de la mécanique céleste, du problème des trois corps, des probabilités), de la physique statistique et des réflexions philosophiques sur le hasard et le déterminisme. Les histoires du chaos ont en fait un avant-gardiste, un « précurseur », ce que j'ai eu l'occasion de discuter et de tenter de clarifier dans l'article de 2007 : « Poincaré, le chaos, quels liens ? »²⁴. De telles analyses rétrospectives de l'histoire signent à quel point il était nécessaire d'historiciser les notions de chaos qui sont le lot quotidien des « chaoticiens » du début du 21^{ème} siècle.

3. Impact sur une institution de recherche, le CNRS

Dans une perspective plus résolument socio-institutionnelle, j'ai produit une longue étude de cas sur l'histoire de l'appréhension des notions de chaos par le CNRS, du contexte préliminaire des années 1970 aux années 1990²⁵. Comment une institution, qui structure une partie de la recherche en France, s'empare-t-elle de thématiques de recherches émergentes, fortement interdisciplinaires, comme le chaos ? Quels ont été les outils de politique de recherche, créés ou simplement mobilisés, sur ces thématiques et avec quels résultats ? Pour ces travaux, j'ai pu bénéficier de l'environnement du *Comité pour l'histoire du CNRS* dans lequel j'ai été impliqué entre 2002 et 2005.

Avant 1970, l'institution est encore structurellement faible et enfermée dans des conceptions très disciplinarisées de la recherche²⁶. Des recherches en physique non linéaire ou sur les systèmes dynamiques ne trouvent guère de place dans les laboratoires et sont très peu discutées dans les instances nationales. La transformation des années 1970, avec la création du département des Sciences pour l'ingénieur, a un effet paradoxal : si les frontières disciplinaires sont redessinées, l'effet de cette nouvelle catégorisation est d'exclure de rares velléités de recherche sur le non linéaire dans les laboratoires propres du CNRS. Dans le même temps de nouveaux outils de pilotage de la recherche font leur apparition au CNRS, comme les « Actions thématiques programmées » : au tournant de 1980 quelques équipes travaillant sur le chaos, la turbulence, le non linéaire, en bénéficieront, par incidence et opportunisme plus que par vision stratégique à long terme.

Dans les années 1980 seulement se pose la question de la programmation de la recherche en mathématiques, qui était jusque-là considérée, au CNRS, soit comme une impossibilité ou une incongruité, soit comme une simple affaire de maintien récurrent de ressources. La question du chaos intègre pleinement les priorités du département MPB (Mathématiques et Physique de Base) du CNRS dès lors que la question des mathématiques est institutionnellement repensée.

²⁴ (Petitgirard 2007) – voir le *Recueil des publications*.

²⁵ Chapitre 11 - (Petitgirard 2004).

²⁶ Dans l'historiographie l'ouvrage (Picard 1990) a longtemps fait figure de référence, avant le travail de refonte appuyée sur les travaux du *Comité pour l'histoire du CNRS* (Guthleben et Blay 2013).

L'interdisciplinarité, et l'interaction des mathématiques avec toutes les branches de la connaissance, est érigée en volonté politique de l'institution : les thématiques du chaos ont constitué un levier dans cette histoire, indicatives d'une convergence socio-disciplinaire féconde et structurée par une épistémologie très ouverte des mathématiques ; le sujet du chaos va également bénéficier de cette politique du CNRS à la fin des années 1980, soit dix ans après la stabilisation d'un champ de recherche à l'échelle internationale.

C. Les pratiques scientifiques dans les sciences du non linéaire

1. Instruments de calcul et de visualisation de la dynamique

Dernière perspective développée durant mon doctorat, la question des pratiques scientifiques a été un sujet considérablement amplifié dans mes recherches. Le renouvellement des pratiques a été tout autant déterminant que les analyses mathématiques, plus abstraites, dans l'émergence de la science du chaos. Au fil de mes travaux, elle a pris le sens d'un possible contrebalancement à une historiographie trop exclusivement orientée sur les concepts et savoirs mathématiques.

Ces pratiques sont de plusieurs ordres. Le raisonnement analogique et le calcul analogique ont, tout d'abord, façonné une partie des travaux en « théorie des oscillations » et ont concouru très tôt à l'étude des systèmes dynamiques. Le sujet de la théorie des oscillations est très directement connecté au monde de la technique. Il a été considérablement accéléré par le développement de la télégraphie sans fil, de la radiotechnique et de l'électricité industrielle, domaines dans lesquels produire les oscillations, voir et mesurer leurs caractéristiques, sont essentiels. Les oscillations, de plus en plus complexes, sont étudiées par les moyens de la technique, de la physique et des mathématiques. Lorsque le caractère « non linéaire » de certaines oscillations sera mis en avant, un sous-domaine d'étude se constituera, prenant différents noms : vibrations non linéaires, oscillations non linéaires ou encore mécanique non linéaire. Par-delà la nature très diverse des systèmes oscillants, dans l'analyse des oscillations, le raisonnement analogique entre des comportements oscillatoires et l'utilisation des moyens de calcul analogique sont des pratiques courantes, au moins jusque dans les années 1960. Les recherches sur les travaux de Nicolas Minorsky et Théodore Vogel (voir ci-dessous) en sont des illustrations.

Parallèlement, et surtout après la seconde guerre mondiale, le calcul électronique numérique se développant, la notion d'« expérience mathématique » se propage, accompagnée par des mathématiciens comme Stanislaw Ulam, dans la lignée des travaux sur les simulations Monte-Carlo. Ses études des itérations non linéaires préfigurent les recherches numériques des années 1970. Les expériences numériques de Fermi-Pasta-Ulam en 1955, cherchant à tester les résultats théoriques de la physique statistique, avaient bousculé les idées sur l'ergodicité dans les systèmes non linéaires. Le météorologue Edward Lorenz, autour de 1960, réalise la simulation numérique sur ordinateur de ses modèles météorologiques, pour étudier le rôle et les conséquences des instabilités dans la prédictibilité des comportements de ces modèles pourtant très simples dans leur expression mathématique. Plus tard sa métaphore de l'« effet papillon », illustrant le phénomène de sensibilité aux conditions initiales, connaîtra un grand succès. L'astronome Michel Hénon, avec Carl Heiles, fait des expériences numériques sur les modèles de la mécanique céleste (1962-63). Un renouveau empirique souffle sur les systèmes dynamiques, traduisant l'impact de l'introduction de l'ordinateur et d'une démarche très « expérimentale » dans l'étude des systèmes non linéaires.

Dans la période 1975-82, les images d'attracteurs étranges obtenues par calculateurs ainsi que les diagrammes de bifurcations pour illustrer les « scénarios de transition vers le chaos » rendent ces dynamiques facilement observables numériquement et graphiquement sur les écrans des ordinateurs. Cette capacité de visualisation dédouble les promesses d'un calcul numérique toujours plus puissant. L'intérêt croissant pour les systèmes de visualisation agit comme un catalyseur de l'émergence de la notion de chaos.

L'intérêt pour ces pratiques empiriques, associant des systèmes de calcul et de visualisation à la construction de savoirs mathématiques est ce qui m'a poussé à prêter toujours plus d'attention aux instruments, aux machines, à une matérialité sous-estimée dans cette histoire, dans toute son étendue temporelle. Chaque contexte mobilise des techniques et des instruments différents, avant une sorte de convergence autour des techniques informatiques dans les années 1980, et autorise des pratiques différentes.

2. Retour sur les théories des oscillations non linéaires

Parmi les sujets qui comptent pour l'analyse de ces pratiques, je me suis particulièrement intéressé à l'histoire du non linéaire et des théories des oscillations non linéaires : des balbutiements des théories à la fin du 19^{ème} siècle jusqu'aux années 1930, puis à travers l'approfondissement de deux trajectoires scientifiques de N. Minorsky et Th. Vogel, rencontrées dans mes recherches de thèse. Ce fut l'occasion de collaborer à partir de 2008 avec Jean-Marc Ginoux, physicien de l'Université de Toulon, qui était alors en cours de travaux de thèse en histoire des mathématiques sur le sujet²⁷, sous la direction de David Aubin et Christian Gilain, tous deux professeurs à l'Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris 6.

Cette collaboration a été marquée par plusieurs participations communes à des colloques et un travail de synthèse²⁸ en 2010, sur l'histoire des « oscillations de relaxation » de 1880 à 1926, qui met l'accent sur les dispositifs techniques au cœur de l'analyse de ces phénomènes oscillants : de l'arc chantant et tubes triode aux technologies liées aux débuts de la télégraphie sans fil. Dans une recherche très systématique, J.M. Ginoux a exhumé un texte de Poincaré datant de 1908, qui était passé entre les mailles du filet historiographique malgré l'originalité de ses résultats. Analysés mathématiquement et remis dans leur contexte²⁹, ces travaux de Poincaré indiquent une maturité théorique sur la question des moyens permettant d'entretenir un phénomène oscillant (toujours dans l'optique de la télégraphie sans fil), assez peu étonnante en soi, venant du mathématicien et ingénieur H. Poincaré. Mais resitués dans leur temps, ils montrent que les ingénieurs de la télégraphie et les physiciens qui s'y sont associés, n'ont pas ressenti le besoin d'approfondir ces résultats : l'empirisme d'une technologie en construction n'a retenu que l'horizon des possibilités ouvert par la proposition théorique du virtuose Poincaré, à savoir que la voie de l'entretien des oscillations par arc chantant est tenable. L'interprétation mathématique de Poincaré sera en quelque sorte retrouvée, dans un tout autre

²⁷ Thèse soutenue en 2010 qui a servi de base à l'ouvrage (Ginoux 2015).

²⁸ (Ginoux et Petitgirard 2010b) présenté à l'occasion des Rencontres du non-linéaire – voir le *Recueil des publications*.

²⁹ (Ginoux et Petitgirard 2010a) – voir le *Recueil des publications*.

contexte, par l'ingénieur-mathématicien russe Alexander Andronov en 1928, inaugurant un renouveau théorique sur les oscillations non linéaires³⁰.

3. Trajectoire scientifique de deux « ingénieurs-mathématiciens »

Dans mon article sur Nicolas Minorsky (1885-1970)³¹ j'ai proposé une biographie scientifique de cet « ingénieur-mathématicien »³² dont les travaux remarquables dans les années 1920 articulaient la construction de savoirs mathématiques sur la stabilité et l'ingénierie du contrôle de navires. Minorsky s'est ensuite fortement impliqué, dans les années 1930-60, dans le développement des théories des oscillations non linéaires et de la stabilité, promoteur infatigable de leur diffusion dans la perspective des questions navales, et au-delà pour tous les problèmes d'ingénieur.

Minorsky est également le concepteur d'un système de calcul analogique baptisé « Analogues dynamiques », resté très confidentiel. Le système a été conçu, et réalisé partiellement en 1935, afin d'apporter des réponses calculatoires, qualitatives et quantitatives, pour l'analyse de systèmes dynamiques non linéaires. Minorsky est à la fois un personnage singulier, passeur de frontières entre l'URSS, l'Europe et les États-Unis, et un acteur de premier plan de la communauté émergente sur les oscillations non linéaires, porteur d'une épistémologie très empiriste des mathématiques.

Mes recherches sur Théodore Vogel, un autre « ingénieur-mathématicien », ont été poursuivies dans l'analyse plus complète du groupe de « Dynamique théorique » construit autour de lui à Marseille, dans le laboratoire CRSIM³³ du CNRS entre 1948 et 1964. Les résultats ont été présentés à plusieurs occasions m'ayant permis de multiplier les perspectives et d'aboutir à une étude complète³⁴.

L'analyse porte à la fois sur le collectif de chercheurs, leurs pratiques mathématiques, leurs efforts pour construire des calculateurs analogiques aussi bien mécaniques qu'électroniques pour étudier la dynamique dans le programme baptisé « Dynamique théorique » qu'ils ont défini, et l'épistémologie des mathématiques sous-tendant leur pratique. J'ai pu rendre compte de la grande cohérence d'un programme de recherche animé par Th. Vogel, qui s'autonomise dans le laboratoire. L'article montre l'intrication des analyses mathématiques des systèmes dynamiques et des machines électroniques dans le laboratoire. Il précise les rapports entre production d'images, supports de visualisation de la dynamique, et calculs pour étudier la dynamique. Mathématiques et machines sont coconstruits en grande partie dans ces études de dynamique théorique. Ce programme est très singulier dans le paysage des mathématiques en France à cette période. Il est en quête de légitimité au plan national, mais paradoxalement n'en trouvera qu'une au plan international. Le programme se termine avec l'entrée massive des ordinateurs dans un laboratoire qui devient le fer de lance du département des Sciences pour l'ingénieur du CNRS. La culture des systèmes dynamiques, hybridée avec la

³⁰ Même si l'historiographie, y compris mes travaux de thèse, a oublié ces travaux de Poincaré, tout ce qui concerne l'école Andronov a conservé sa pertinence, notamment les travaux de référence (Dahan Dalmedico 2004).

³¹ (Petitgirard 2015) – voir le *Recueil des publications*.

³² Dans un sens inspiré de celui de l'« ingénieur-savant » d'Ivor Grattan-Guinness (Grattan-Guinness 1993).

³³ Centre de Recherches Scientifiques, Industrielles et Maritimes de Marseille, devenu Centre de Recherches en Physique (CRP), en 1958. C'est aujourd'hui le LMA – Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique.

³⁴ En cours de publication avec l'intitulé « Machines analogiques et mathématiques des systèmes dynamiques » (Petitgirard 2018a) – voir le *Recueil des publications*.

simulation numérique, se perpétue à travers les nouveaux programmes de recherche désormais étiquetés « Mathématiques appliquées et modélisation mathématique ».

D. Extensions et recherches en cours

Ces perspectives développées à partir des travaux doctoraux ont été étendues dans plusieurs directions, au gré des collaborations et projets de recherche développés.

1. Rapport avec la prospective

Ecrire une histoire du chaos, c'est aussi contribuer à l'histoire des idées sur le déterminisme en science. Or en 2010, dans l'enceinte du Cnam, cette interrogation a trouvé un écho dans le champ de la prospective stratégique. La collaboration avec Michel Godet et Philippe Durance³⁵ m'a donné l'opportunité de réfléchir à l'articulation entre l'histoire des idées scientifiques sur le déterminisme, la pensée sur le changement (constitutive de la prospective) et la gestion des incertitudes. Nos échanges ont nourri ma contribution à l'ouvrage *Mélange - Prospective stratégique* (2014) intitulé : « Les lectures scientifiques du changement et de l'incertitude : une perspective historique »³⁶. L'occasion a été pour moi d'introduire un temps très long dans l'analyse, de mettre en résonance mes travaux sur le chaos et le déterminisme avec la problématique de la pensée du risque, des incertitudes, du libre arbitre et l'histoire même de l'émergence de la prospective au milieu du 20^{ème} siècle.

2. Les instruments mathématiques avant 1950

Plus directement en rapport avec les investigations sur les instruments et les savoirs mathématiques, en décembre 2017, j'ai été invité par Dominique Tournès au « Workshop » du « Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach » (Allemagne) : « Mathematical Instruments between Material Artifacts and Ideal Machines : Their Scientific and Social Role before 1950 »³⁷. Le Workshop a été conçu sur le pari de réunir une cinquantaine de spécialistes de l'histoire des mathématiques, du calcul, de l'histoire des instruments venant du monde académique et du monde des Musées et de la conservation du patrimoine. Cette semaine a été une occasion unique de faire un tour d'horizon sur le sujet des instruments mathématiques, appuyé par des approches historiennes, académiques et muséales, restées trop longtemps cloisonnées.

L'alignement thématique avec mes préoccupations de recherche, la diversité des problématiques soulevées ont fait de ce Workshop un moment clé de mes orientations et projets actuels. J'ai saisi cette première opportunité pour esquisser et mettre en discussion mes recherches sur les « instruments de Fourier » - une présentation très embryonnaire au regard de la réflexion en cours. Ce Workshop a nourri mes recherches en leur donnant une profondeur historique qui dépasse de beaucoup mon horizon de recherche habituel, puisque plusieurs participants étaient spécialistes de l'époque médiévale et de l'époque moderne, donc dans un avant 1950 très large. Cette borne temporelle, 1950, m'a d'ailleurs posé question : ce choix veut marquer le tournant représenté par l'entrée de l'ordinateur dans le champ scientifique, provoquant des bouleversements épistémologiques et une focalisation des usages sur les

³⁵ Michel Godet a été professeur titulaire de la chaire de Prospective industrielle, Philippe Durance est actuellement professeur titulaire de la chaire de Prospective et développement durable au Cnam.

³⁶ (Petitgirard 2014) – voir le *Recueil des publications*.

³⁷ Organisé par Samuel Gessner (Lisbonne), Ulf Hashagen (Munich), Jeanne Peiffer (Paris), Dominique Tournès (La Réunion) du 17 au 23 décembre 2017. [URL : https://www.mfo.de/occasion/1751/www_view consulté le 19/02/2019]

systèmes informatisés. En axant ma présentation sur les « instruments de Fourier », et plus globalement sur les systèmes analogiques, cette borne m'est apparue très fragile. En parallèle de l'avènement d'une instrumentation digitale automatisée amenée par l'ordinateur, il persiste une grande continuité dans la conception de nombreux instruments mathématiques au-delà de 1950.

Tout l'intérêt de « l'entrée par les instruments » réside dans le fait de se situer d'emblée au carrefour de la réalisation et l'utilisation d'un artefact matériel, et du développement de concepts, méthodes et théories. Reste à repenser le rôle des mathématiques dans les instruments, dans la conception des instruments, dans les fonctions épistémiques des instruments. Les questions qui en découlent sont nombreuses : quels types de mathématiques sont « embarqués » dans les instruments ? Quels sont les usages de ces instruments mathématiques et leur fonction sociale ? La pertinence de ces interrogations sur la période postérieure à 1950 ne fait aucun doute et elles sont devenues centrales dans mon analyse des rapports entre instrumentation et production des savoirs mathématiques.

3. Les instruments scientifiques comme porteurs de savoir mathématique ?

En 2017 et en parallèle à la préparation de ce Workshop, j'ai pu m'associer à Martina Schiavon et Maarten Bullynck pour développer ces perspectives au cœur du séminaire organisé à l'Institut Henri Poincaré (IHP), dans le cadre des Séminaires d'Histoire des mathématiques : « Les instruments scientifiques comme porteurs de "savoir" mathématique ? »³⁸. Ce séminaire a pour ambition de porter une réflexion sur les nouvelles pratiques de l'histoire afin de mettre en évidence les relations mutuelles et réciproques entre l'instrument conçu comme objet-« porteur de pratiques » et objet-« porteur d'un savoir ».

Lors de la première session du 9 juin 2017, consacrée aux relations entre pratiques, usages et savoirs dans l'étude des instruments scientifiques, j'ai pu dessiner quelques perspectives sur la question au 20^{ème} siècle, en insistant sur la nécessité de regarder « à côté » de l'ordinateur et éviter la focalisation exclusive sur cet instrument particulier. La question des transformations des pratiques du début du 20^{ème} siècle, comme les bureaux de calcul et le calcul analogique, face à l'émergence de l'ordinateur a structuré la deuxième journée d'étude du 6 avril 2018. À cette occasion, j'ai pu élaborer ma réflexion sur les « instruments de Fourier », sur la période 1930-1960.

La séance du 22 mars 2019 s'est concentrée sur l'outillage intellectuel des mathématiques et ses applications au 20^{ème} siècle. Si le papier et les notations mathématiques sont considérés comme les supports classiques des mathématiques, elles sont aussi soumises aux évolutions historiques. Le séminaire a questionné le passage des utilisations individuelles de formes mathématiques, dans les matérialités de la pratique mathématique, à l'établissement des prescriptions et formulaires destinés à un usage collectif et fixé à l'avance. Le séminaire a permis d'interroger particulièrement cette évolution dans le militaire (calcul balistique), dans l'industrie (contrôle de qualité) et dans les mathématiques mêmes (les matrices).

4. Mathematical communities after the First World War

En 2018, j'ai été invité au Workshop du CIRM³⁹ consacré à l'analyse des reconfigurations des communautés scientifiques après-guerre, organisé du 12 au

³⁸ Voir en annexe (page 315) les programmes des trois sessions 2017, 2018, 2019.

³⁹ Centre International de Rencontres Mathématiques – Luminy (près de Marseille).

16 novembre⁴⁰. Ce séminaire a eu pour vocation de questionner la dynamique entre les « nouveaux » et les « anciens » territoires, consécutifs aux bouleversements géopolitiques issus de la guerre, les nouveaux et les anciens acteurs, l'évolution des disciplines internes et des idées mathématiques, en explorant aussi les colloques mathématiques internationaux, la circulation des journaux et des livres à l'échelle européenne.

Reprenant le fil des travaux réalisés en collaboration avec J.M. Ginoux sur les théories des oscillations, j'ai pu revoir ces analyses mathématico-centrées et construites sur des parcours biographiques d'acteurs, en un essai synthétique de caractérisation de la constitution d'une communauté de spécialistes des oscillations non linéaires dans la décennie qui suit la fin du premier conflit mondial. Cette émergence mêle des acteurs de plusieurs pays européens, l'entrée en jeu des États-Unis en rapport avec des problématiques industrielles et militaires, et des travaux réalisés dans l'URSS naissante, malgré les complexités des relations internationales. Les travaux à l'échelle de cette communauté se caractérisent par un passage de savoirs très empiriques, orientés par le savoir-faire technologique, aux premières conceptions sur les oscillations non linéaires. Ce qui domine alors cette décennie, ce sont les pratiques d'essais en grand nombre, d'analyses par analogies, la plus récurrente étant l'analogie électro-mécanique, dans des domaines qui, jusque-là, étaient très cloisonnés : électrotechnique, radiotechnique, mécanique des vibrations, ingénierie navale, acoustique, etc. L'autre trait caractéristique de cette période est la lente convergence théorique et conceptuelle, dont le point de fuite est rétrospectivement l'année 1928 marquée par les travaux d'Andronov en URSS.

Sur fond de construction de cette communauté, je me suis concentré sur la trajectoire de N. Minorsky, dont l'analyse se poursuit dans le cadre d'une réflexion avec Laurent Mazliak (UPMC – Paris 6) qui étudie les mathématiciens dans l'émigration russe à Paris. Cela permettra de mieux connaître la phase première des travaux de Minorsky, son réseau et les intersections avec le milieu européen. Il est prévu que ces travaux paraissent en 2020, dans l'ouvrage collectif « Mathematical Communities in the Reconstruction after the Great War (1918-1928). Trajectories and Institutions » de la série Springer « Trends in History of science ».

III. Histoire des sciences, des techniques et valorisation du patrimoine : allers-retours (2005-2011)

Cette relecture de mes travaux renvoie aux termes de ma première ligne de recherche, qui m'a conduit de l'analyse historique des savoirs mathématiques aux interrogations sur les instruments scientifiques qui leur sont liés. Les quelques lignes qui suivent précisent mon rapport aux cultures matérielles de l'instrumentation, qui fait écho à ma fréquentation du Musée du Cnam et de ses collections.

A. Valorisation du patrimoine scientifique et technique : agir et réfléchir

En effet mon arrivée au Cnam en 2005 s'est faite sur un triple projet associant la recherche, l'enseignement et la diffusion de la culture scientifique et technique, au niveau d'un service du Cnam gérant ce type de projets de médiation. Le projet coïncidait avec la question

⁴⁰ « Les communautés mathématiques dans la reconstruction de l'après-guerre (1918-1928) », 12 - 16 Novembre 2018. Organisé par Tom Archibald (Simon Fraser University) Angelo Guerraggio (Università Bocconi), Laurent Mazliak (Université Pierre et Marie Curie) et Rossana Tazzioli (Université Lille 1). [URL : <https://conferences.cirm-math.fr/1850.html> consulté le 19/02/19].

de la redynamisation du Musée après sa rénovation et réouverture en 2000, l'élargissement de ses missions sur la sauvegarde et la valorisation du patrimoine contemporain et l'intégration dans l'établissement des politiques publiques en faveur de la culture scientifique. Si une telle position amène son lot de contraintes, j'y ai trouvé matière à un renouvellement de ma trajectoire de recherche, dans un contexte unique : le Musée et ses collections.

La réalisation technique des expositions étant dévolue aux services du Musée, mon travail s'est concentré sur la conception intellectuelle des projets. Concevoir une exposition muséographique est un exercice de valorisation du patrimoine, un acte de vulgarisation et de médiation qui impose un travail épistémologique sur les savoirs et les objets techniques. L'exercice est également générateur de recherches historiographiques nouvelles, élémentaires pour certaines, comme l'élaboration d'une documentation, d'un catalogue, d'une revue d'objets, etc. ou résultantes d'une collaboration multidisciplinaire dans d'autres cas.

Étant données les expositions auxquelles j'ai contribué, j'ai pu éprouver et aiguiser trois ordres de réflexions : un premier sur la matérialité électronique de notre monde « numérique » ; un deuxième sur les complexités de l'instrumentation scientifique, avec une focalisation sur les instruments de calcul ; et plus généralement une réflexivité sur les modes de médiation culturelle des sciences et techniques, sur les limites de la vulgarisation et le renouvellement possible des formes. L'ensemble de mes contributions et réflexions a donc été cadré par plusieurs disciplines : l'histoire et l'épistémologie des sciences et techniques, les sciences de l'éducation, les sciences de l'information et de la communication.

B. Le patrimoine et la matérialité du monde numérique

Il m'est impossible ici de détailler toutes les expositions sur le sujet du numérique, avec leurs déclinaisons, auxquelles j'ai pris part⁴¹ : je ne mentionnerai que celles qui ont représenté un incrément cognitif et réflexif important dans ma trajectoire. Ma première expérience sur le sujet des transformations numériques du monde contemporain remonte à l'exposition « 60 ans d'innovation en informatique » ouverte en octobre 2005 par le Cnam Champagne-Ardenne⁴². Au-delà de la volonté de faire découvrir le patrimoine considérable de l'informatique au plus grand public et de montrer l'évolution des techniques numériques récentes, ce fut pour moi une vraie confrontation à leur matérialité : le grand système des années 1960 « Bull Gamma-3 » ou « IBM Stretch », les premiers mini-ordinateurs de la SEA « CAB 500 » imposent leurs dimensions, leur poids. La seule vision de ces machines a une vertu pédagogique dans un 21^{ème} siècle qui se pense en phase de « dématérialisation ». Ce sont autant de structures et infrastructures du numérique, certes miniaturisées au fil du temps, évacuées de notre regard d'utilisateur et de consommateur à l'ère numérique. Je pourrais comparer cette expérience à la découverte du Musée des arts et métiers pour un historien des sciences et des techniques qui n'aurait été confronté qu'aux textes et archives. Rien dans la fréquentation de l'historiographie ne peut remplacer la mise en présence et le contact avec les objets techniques.

⁴¹ Pour complément, voir le CV joint au dossier.

⁴² Partenariat entre le Cnam, la Ville de Reims, le Musée des arts et métiers et l'Aconit (Association pour un conservatoire de l'informatique et de la télématique) qui possède un patrimoine informatique parmi les plus importants en Europe. Dans sa communication publique et les événements attenants (soirées scientifiques, colloque) l'exposition portait le titre « Lampes, Puces et tutti Quanti : l'à-venir de l'informatique ». Commissariat : Girolamo Ramunni, Gérard Villerman-Lécollier, Loïc Petitgirard.

Cette exposition a été un jalon dans mes réflexions, qui ont trouvé un écho dans le *Consortium Artefacts*⁴³ : réseau international d'historiens des sciences et des techniques attachés à des musées et institutions patrimoniales. Initiative lancée en 1993 par Robert Bud du Science Museum et Bernard Finn du Smithsonian Institution, ce réseau s'organise grâce à des rencontres annuelles, depuis 1996, et constate que les objets de collection n'ont pas une place suffisante dans les travaux des historiens. En plein « tournant matériel »⁴⁴ dans les années 1990, le réseau a promu la matérialité des objets et instruments, comme sujets de recherche en eux-mêmes et comme ressources à intégrer dans les récits historiographiques. Ma participation aux rencontres de 2006 et 2007 m'a permis de nouer des contacts, avec Robert Bud en particulier, et d'élaborer des points de vue à l'interface entre le monde académique et celui des musées.

En 2006, il a été décidé au Cnam d'organiser un programme culturel plus ample autour de l'électronique, assorti d'un programme de recherches historiques, d'entretiens, de recherches en quelque sorte appliquées et finalisées. L'occasion des 60 ans de l'invention du transistor (1947) a servi de prétexte initial. J'ai participé au commissariat scientifique de l'exposition « 1000 milliards de transistors », organisée en 2007 par le Cnam Nantes, en partenariat avec le tissu industriel local. L'exposition a été déclinée au Musée en 2008, assortie d'un colloque sur les révolutions électroniques⁴⁵.

L'exposition « De mémoire d'ordinateurs » organisée de novembre 2008 à avril 2009 au Musée du Cnam⁴⁶ a été l'occasion d'aller plus avant dans l'histoire technologique des ordinateurs, avec une mise en récit des technologies de mémorisation en informatique, entre obstacles et promesses des mémoires électroniques. Jalon sous-estimé dans l'histoire de l'informatique, alors que c'est un organe central de la machine à « programme enregistré », les technologies de mémoire ont constitué un nœud technique des premiers ordinateurs jusqu'aux années 1980. Ma collaboration à la réalisation de cette exposition est à l'image de ce que peut apporter l'historien des techniques et qui rejoint mes problématiques de recherche : la question de la mémorisation est un obstacle, une limite, une contrainte permanente entre 1950 à 1980, dans tout ce qui concerne les mutations de l'instrumentation vers le numérique.

Enfin en 2010 le Musée a fait le pari de la valorisation du patrimoine vidéo-ludique, en relation avec l'acquisition récente d'une riche collection de micro-ordinateurs et de jeux vidéo⁴⁷. Aux côtés de Stéphane Natkin⁴⁸ et Pierre Giner⁴⁹ j'ai été commissaire scientifique de l'exposition « Museogames : une histoire à rejouer ». Elle a été créée en 2010 au Musée et déployée ensuite dans plusieurs lieux en France. Cette première grande exposition dédiée au patrimoine des jeux vidéo en France a été l'occasion de souligner la culture technique et industrielle, qui s'exprime au travers des matériels et logiciels de jeu, propre à une pratique culturelle contemporaine.

⁴³ [URL : <http://www.artefactsconsortium.org/> consulté le 2/03/2019].

⁴⁴ Je discuterai plus en détails de ce « tournant matériel » dans la seconde partie du mémoire.

⁴⁵ Exposition « La révolution électronique » sur l'année 2008, avec le colloque organisé en juin 2008.

⁴⁶ En partenariat avec la FEB, Fédération des Équipes Bull, en charge de la sauvegarde et valorisation du patrimoine de l'informatique de l'entreprise [URL : <http://www.feb-patrimoine.com/> consulté le 22/02/2019].

⁴⁷ Collection dite « Bizoire » du nom du collectionneur auquel elle a été rachetée, en 2006, par le Musée. Vaste chantier patrimonial, pris en charge par Isabelle Astic, chargée de collection au Musée, qui fournit aujourd'hui matière à recherche historique, en particulier sur l'histoire de la micro-informatique.

⁴⁸ Professeur du Cnam, directeur de l'ENJMIN et chercheur au laboratoire CEDRIC du Cnam.

⁴⁹ Artiste et enseignant à l'Ecole Duperré.

C. Le patrimoine de l'instrumentation scientifique

Dans les collections du Musée des arts et métiers, l'instrumentation scientifique a une place de choix, résultat de trois siècles de collecte et de conservation d'objets techniques emblématiques et uniques au monde pour beaucoup. Néanmoins, entre 1950 et 2000 cette collecte s'est quelque peu ralentie alors que l'expansion scientifique et technique atteignait un rythme sans égal : les objets techniques du passé ont été trop simplement considérés comme obsolètes, inutiles, et beaucoup n'ont pas rejoint les collections. Au tournant du 21^{ème} siècle, la prise de conscience de l'importance d'un patrimoine en perdition, doublé de l'expérimentation du réseau Patstec⁵⁰ en construction ont fait lentement évoluer les pratiques. En 2005, à l'occasion de l'« Année mondiale de la physique », cette nouvelle ambition a fait germer le projet d'une restructuration de la partie « Instruments scientifiques contemporains » du Musée. La rénovation de l'espace des collections permanentes a été associée à une politique de collecte d'instruments dans plusieurs laboratoires de recherche. À cette occasion, l'emblématique « chambre à fil » du physicien George Charpak est entrée dans les collections, aux côtés d'un « Spectroscopie à transformée de Fourier » du Laboratoire Aimé Cotton, instrument très important pour les recherches sur les rapports entre mathématiques (de Fourier) et instrumentation qui sont les miennes aujourd'hui.

En 2006, le projet de recherche sur les « Instruments du calcul savant »⁵¹ prévoyait l'organisation une exposition de valorisation de ces instruments du Musée. J'ai été associé comme collaborateur à ce projet d'exposition ouverte entre le 21 novembre 2006 et le 29 avril 2007, intitulée : « Venez prendre l'aire ! Les instruments de mesure des surfaces ». Tout dans son projet intellectuel stimulant, porté sur les savoirs et pratiques mathématiques liés à des instruments, concordait avec mes lignes de recherche en développement après ma thèse. Le projet a été l'occasion d'échanges scientifiques avec deux des animateurs de ces recherches, Dominique Tournès et Marie-José Durand-Richard. Il a permis ma progressive intégration dans les réflexions sur les instruments mathématiques, au croisement des questions des pratiques et des instruments des sciences du non linéaire. Ces réflexions se sont traduites par mes différentes participations aux Journées d'étude, colloques et Workshops.

IV. Histoire croisée de la métrologie nationale et du Cnam : acteurs, politique scientifique, institutions (2012-2015)

Si ma principale ligne de recherche a pour horizon les savoirs mathématiques et l'instrumentation scientifique, la présentation qui précède a dessiné en creux mon intérêt croissant, depuis ma thèse, et ma volonté de renouveler mon approche en matière d'histoire des institutions des sciences et techniques. L'opportunité s'est présentée avec mon implication dans les travaux de recherche sur l'histoire du Cnam à partir de 2012. Ce sujet est devenu de fait une

⁵⁰ Mission nationale de sauvegarde du Patrimoine scientifique et technique contemporain (Patstec), pilotée par le Musée et la conservatrice en chef du patrimoine Catherine Cuenca. [URL : <http://www.patstec.fr/PSETT> consulté le 2/03/2019].

⁵¹ Dans le cadre de l'Action concertée « Histoire des savoirs », programme conjoint du CNRS et du ministère de la recherche. Le projet associait une équipe de six chercheurs : Konstantinos Chatzis, Ahmed Djebbar, Marie-José Durand-Richard, Joachim Fischer, Dominique Tournès et Galina Zverkina.

deuxième ligne de force de mes recherches, que je suis parvenu à articuler, sur un certain nombre de points, avec la première.

Bien avant mon insertion dans ces projets, l'activité de recherche sur l'histoire du Cnam avait produit une historiographie considérable, fortement renouvelée à l'occasion du bicentenaire de l'établissement en 1994. Le *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* (1794-1955) publié à cette occasion est devenu un ouvrage de référence, montrant au travers des parcours des professeurs du Cnam, la multiplicité des ancrages de l'institution au monde socio-économique depuis le 19^{ème} siècle. Les premiers *Cahiers d'histoire du Cnam* (5 numéros entre 1992 et 1996) sont parus, mais la publication s'est tarie faute de moyens de fonctionner après l'anniversaire.

Vingt ans après, à la faveur de ma position institutionnelle au Cnam, j'ai pu m'associer aux deux animateurs des recherches du bicentenaire : André Grelon (EHESS) et Claudine Fontanon (EHESS / HT2S-Cnam). Le chantier historiographique du second volume du *Dictionnaire* sur la période 1945-75, et plus largement celui du Cnam durant les Trente Glorieuses, était en cours sous leur pilotage, avec des séminaires réguliers sur le sujet et un programme au long cours. Camille Paloque-Bergès (HT2S-Cnam) et moi-même les avons rejoints dans ce projet d'édition. L'histoire de l'établissement est en effet assez bien documentée dans sa longue construction au 19^{ème} siècle, elle l'est beaucoup moins sur la période récente. Le travail réalisé depuis 6 ans, autour des Trente Glorieuses, montre à quel point cette histoire est en fait profondément méconnue !

A. Entrée dans l'histoire du Cnam : l'Institut national de métrologie

Au carrefour de mes multiples intérêts de recherche, je me suis engagé dans une première recherche sur l'histoire de la métrologie au Cnam (2012). L'état historiographique montrait en pointillé une longue histoire commune du Cnam et de la structuration de la métrologie nationale, remontant à la fondation même de l'établissement en 1794 et à l'élaboration du « Système métrique ». Or, très rapidement dans mes premières analyses, le Cnam s'est révélé avoir joué un rôle essentiel dans les restructurations de la métrologie nationale, au fil des années 1960. C'est ce qui a présidé à ma proposition (novembre 2012) d'organisation avec A. Grelon et C. Fontanon d'une Journée d'étude le 17 octobre 2013 : « La métrologie au Conservatoire national des arts et métiers dans les Trente Glorieuses »⁵², Journée inscrite dans le programme scientifique mentionné ci-dessus.

L'orchestration d'une recherche sur l'histoire de la métrologie au Cnam constitue donc ma véritable entrée dans le chantier historiographique de l'institution. Ces recherches m'ont conduit à la publication d'une série de travaux dans les *Cahiers d'histoire du Cnam* - numéro 3 de la nouvelle série, publiée depuis 2013. Ce fut l'occasion en parallèle d'un travail sur le corpus de « Métrologie » pour le Cnum, Conservatoire numérique des arts et métiers (voir ci-dessous).

1. Pourquoi écrire une histoire croisée ?

Au départ de la problématique de recherche il y a un double constat : d'une part, l'organisation de la métrologie nationale dans les années 1960 traverse une crise profonde et ne répond plus aux exigences du temps, ni sur le plan des demandes des industriels, ni dans ses relations avec les instances internationales. D'autre part le Cnam est présent en permanence

⁵² Programme en annexe, page 314.

dans la phase de diagnostic, de définition et de mise œuvre de la restructuration de la métrologie nationale, laquelle durera en fait plus de 25 ans. Très concrètement cette restructuration se traduit en 1967 par la création de la chaire de Métrologie au Cnam, de l'Institut national de métrologie dans la foulée en 1968, et du Bureau national de métrologie en 1969, hébergé par le Cnam dans un premier temps. Les missions dévolues à chacune de ces entités définissent les contours de la nouvelle structure nationale en développement.

Comment expliquer cet état de crise, dans le pays qui a fait naître le système métrique et participé à l'organisation de la métrologie internationale depuis le 19^{ème} siècle ? Quelles sont les dynamiques à l'œuvre sur le plan scientifique, institutionnel et politique dans les années 1960 qui président à cette crise et à ses conséquences organisationnelles ? Étant donné la longue histoire des rapports du Cnam à la métrologie, quel est le rôle exact du Cnam dans cette restructuration ?

Mettre mes pas dans le programme des recherches sur l'histoire du Cnam signifiait adopter une démarche biographique et prosopographique, dans une perspective d'histoire institutionnelle, ce que j'avais déjà pratiqué : la journée d'études a eu pour vocation de convier quelques protagonistes de l'histoire et a été doublée d'entretiens avec les acteurs. Cette orientation biographique est alignée avec le projet de *Dictionnaire des professeurs du Cnam* et a déjà nourri deux notices biographiques⁵³.

À l'appui de cette recherche, les archives concernant la restructuration de la métrologie nationale et les transformations du Cnam correspondantes, dans les années 1960 et jusqu'à la fin des années 1980, sont très bien conservées au Cnam, et ce n'est pas un hasard : elles ont été conservées là où les instances se sont réunies durant toute la phase de restructuration. Il en est de même pour le SHD (Service Historique de la Défense – Vincennes), étant donné le rôle du militaire dans les questions métrologiques, et son impulsion vers le civil, une des raisons présidant aux restructurations. En termes d'archives, le corpus se décompose *grosso modo* en :

- Archives du Cnam sur la chaire de Métrologie : création de la Chaire, recrutement d'André Allisy, les programmes des enseignements de métrologie (avant et après 1967), les statistiques d'auditeurs.
- Archives du Cnam sur la création de l'INM (Institut national de métrologie) et du BNM (Bureau national de métrologie, qui a été accueilli dans le Cnam initialement) : moyens, projets scientifiques, dossiers des personnels.
- Archives du Cnam concernant le LNE, qui est structurellement partie intégrante du Cnam jusqu'en 1978, même si géographiquement il est situé rue Boissier, Paris 15^{ème} (et qu'il est en phase de dissociation du Cnam dès 1970).
- La bibliothèque du Cnam conserve toute l'enquête nationale sur l'organisation de la métrologie réalisée en 1968 (par E. Fromy, sur commande de la DRME et DGRST).
- Au SHD sont conservées les archives de la DRME qui agit conjointement avec la DGRST sur la question de la métrologie⁵⁴.

⁵³ En annexe se trouvent les biographies inédites d'André Allisy (page 331) et de Maurice Bellier (page 342), professeur d'électrotechnique au Cnam et directeur du LNE (1949-1969).

⁵⁴ La DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) est l'organe de la politique scientifique et technique militaire mise en place sous De Gaulle, pour la coordination nationale des recherches à caractère militaire. La DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique) est un pendant civil, sorte de préfiguration d'un futur Ministère de la Recherche.

2. Le Cnam et la restructuration de la métrologie française dans les années 1960

Pour le volume des *Cahiers d'histoire du Cnam*, nous avons voulu avec C. Fontanon mettre au clair, de manière synthétique, l'histoire commune du Cnam et de la structuration de la métrologie entamée au 19^{ème} siècle. Cette dynamique se décompose en trois grandes phases : le Conservatoire qui accompagne le développement du Système métrique (1795-1848) ; puis sous l'action d'Arthur Morin le Conservatoire est propulsé comme acteur technique de la métrologie nationale et internationale, à l'heure de la création du BIPM⁵⁵, entre 1848 et 1900 ; l'après 1900 est une phase de conflits, de divergences entre acteurs de la métrologie aboutissant à une perte de leadership du Cnam et aux crises des années 1960 (voir ci-dessous). Dans cette dynamique, la création du Laboratoire d'essais (LNE) au Cnam en 1900 peut être vue rétrospectivement comme la première tentative d'organiser un système métrologique national. Mais déjà à sa création, une partie de la métrologie lui échappe : les références pour la mesure du temps sont l'apanage de l'Observatoire de Paris, celles des grandeurs électriques seront assurées par le Laboratoire central d'électricité (LCE). Une tentative de redynamisation de la métrologie au Laboratoire d'essais dans les années 1930 se soldera par une nouvelle déception institutionnelle, même si elle aboutit à la mise en place des premiers cours de métrologie au Cnam à partir de 1936, assurés par Pierre Fleury.

Ces relations de longue date font le paradoxe du constat alarmant établi dans les années 1960. En pleine expansion économique, industrielle et scientifique, au rythme des transformations gaulliennes, le Laboratoire d'essais traverse une crise multiforme : crise d'identité, crise financière, manque de personnel, crise « scientifique » du fait des activités d'essais qui polarisent le laboratoire. Pour une bonne partie, ces points sont récurrents dans l'histoire du LNE.

La définition de ces missions est le sujet des crispations des acteurs en interne au Cnam : faut-il un laboratoire focalisé sur les essais et contrôles, dans une optique de service aux industries, ou un laboratoire qui combine essais et recherche scientifique sur les références métrologiques ? Les changements successifs de position sur les missions du laboratoire sont une partie de l'explication du décalage perçu dans les années 1960⁵⁶ par rapport à d'autres pays développés.

De cette crise récurrente émerge la dynamique de restructuration, qui passe par plusieurs phases (pouvant se recouper chronologiquement) :

- La première phase est une amplification de la crise au LNE, jusqu'au premier rapport mettant à plat les missions et objectifs du LNE en 1964. La rédaction de ce rapport, avec les réunions et les consultations préalables, est un temps essentiel pour la future restructuration : tout se déroule au Cnam, et si le diagnostic est focalisé au départ sur le LNE, c'est à cette occasion que les discussions et les négociations sur la réorganisation nationale sont engagées avec les acteurs impliqués.

⁵⁵ Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) a été créé en 1875 à l'occasion de la Convention du Mètre.

⁵⁶ Au tournant de 1960, dans d'autres pays développés, la métrologie est déjà très organisée et souvent pilotée à l'échelle nationale par une agence unique : aux États-Unis le National bureau of standards (NBS) a été créé en 1901 ; en Allemagne le Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) créé en 1887 a concentré progressivement les prérogatives métrologiques ; au Royaume-Uni le National Physical Laboratory (NPL) est installé depuis 1900.

- La seconde phase est celle des actions inter-organismes et interministérielles pour élaborer un plan national pour la métrologie (1964-1967) : le plan démarre avec la crise du LNE, il se développe sur commande de la DRME⁵⁷ souhaitant connaître les ressources en matière de métrologie à l'échelle nationale, et il aboutit au premier projet de Bureau national de métrologie. Cnam, DRME puis DGRST s'imposent comme les trois acteurs institutionnels décisifs de cette histoire.

- La troisième phase est la mise en place effective de cette solution : des enquêtes de terrain (1968-1969) aux transformations des organisations, c'est un retour aux acteurs, un passage des intentions aux réalités des organisations et à ses complexités (1970-1978).

Cette histoire de la restructuration nationale aboutit à la séparation entre le LNE, transformé en Établissement public à caractère industriel et commercial, et le Cnam, qui est officialisée en 1978. Le paysage est transformé mais la structuration n'est pas terminée : le processus continue en réalité jusqu'à l'aube du 21^{ème} siècle avec les rapprochements progressifs de tous les acteurs de la métrologie nationale, ce qui était en suspens depuis la fin du 19^{ème} siècle.

Je voudrais insister sur plusieurs traits originaux saillants dans ces travaux historiques. Tout d'abord, revenir sur la construction de la « solution » BNM. La structure imaginée en 1968 est une solution singulière, *ad hoc*, sans équivalent dans d'autres pays. Le BNM était attendu pour résoudre la crise et il a mis 25 ans à se développer complètement. Ce n'est pas un système intégré comme dans d'autres pays, mais un dispositif de coordination interministérielle des grands acteurs de la métrologie, d'incitation au développement des activités de métrologie, de financement et d'interfaçage avec l'industrie. Dans sa forme c'est une création hybride de l'expérience de quelques acteurs, dont Pierre Aigrain et Georges Denègre venus de la DRME, et c'est aussi le fruit d'un outil de politique scientifique inauguré par la DGRST : les « Actions concertées » permettant de décloisonner les opérations, en termes institutionnels et disciplinaires.

Le deuxième point qui se dégage tient au mode opératoire choisi pour cette nouvelle organisation. Mettre la focale sur le Cnam et son Conseil d'administration donne à voir une structuration qui est tout autant une demande du pouvoir politique que d'acteurs et d'opérateurs du terrain de la métrologie. L'opération est bien sûr cadrée par la politique scientifique et technologique souhaitée par de Gaulle⁵⁸. Mais la microsociologie des acteurs, et leurs biographies, montre leur convergence et leur attachement à une vision de la métrologie scientifique : le sujet de la métrologie doit devenir une priorité de la recherche scientifique et non plus seulement un service aux laboratoires et à l'industrie. Voilà qui tranche avec les attermoissements et les dilemmes qui ont handicapé le développement du LNE depuis la fin du 19^{ème} siècle. Tous les acteurs majeurs engagés sont des chercheurs de premier plan, reconnus internationalement. La conjonction la plus remarquable étant le trio : Pierre Aigrain (DRME / DGRST), André Allisy (au BIPM et futur titulaire de la chaire du Cnam) et Jean Terrien (directeur du BIPM). Ils se connaissant bien et sont tous réunis au Cnam dès 1964 pour construire la recherche, l'enseignement et l'organisation nationale. Cela signe la concordance avec l'héritage du Cnam et ses missions de relations avec les industries et la formation professionnelle. Par ailleurs la création d'une chaire au Cnam est un instrument structurant d'un

⁵⁷ Voir note 54.

⁵⁸ Voir par exemple (Bonneuil 2005).

enseignement à l'échelle nationale. La légitimité acquise par la métrologie scientifique est un processus à multiples échelles, cadré par les instruments de la politique scientifique nationale, par des savoirs élaborés et circulant à l'échelle internationale, dont le BIPM est un garant, et par la sociologie des acteurs de cette métrologie. C'est sur ce point que l'élucidation biographique a été particulièrement importante.

3. Perspectives de recherche

Ces travaux ont permis de clarifier le rôle du Cnam dans les années 1960 et ont généré de nouvelles questions et perspectives de recherche. Dans les chantiers tout juste défrichés, il y a d'abord les rapports entre civil et militaire dans cette histoire, dont on a pu constater qu'ils jouent main dans la main au sujet de la restructuration nationale. Dans la période gaullienne cela n'a rien de surprenant étant donné les enjeux et les acteurs impliqués. Le modèle américain dans l'organisation de ces relations⁵⁹ est mentionné régulièrement par les acteurs. En parallèle des « Actions concertées » de la DGRST, les financements de la DRME agissent dans une volonté de dynamiser certains secteurs de la recherche métrologique et dans la volonté de faire reposer la recherche de base sur le monde académique civil. C'est un mode de financement, de contractualisation, de veille et de suivi des activités civiles qui se met en place manifestement dans la métrologie des années 1960, mais dont on perd la trace après 1970, avec encore des difficultés d'accéder à des archives pas toujours communicables aujourd'hui.

Le second terrain à explorer concerne les laboratoires essentiels impliqués dans l'histoire : l'INM a fait l'objet de plusieurs investigations (voir ci-dessous) mais le LNE d'une part et le LCA (Laboratoire central de l'armement) d'autre part, restent mal connus en termes historiques. L'histoire du LNE, si elle a trait au Cnam pour une partie, dépasse largement les portes du Cnam⁶⁰. Étant donné son rôle dans la métrologie française et dans la normalisation de l'industrie et de l'économie, le LNE est partie intégrante de la colonne vertébrale du système technique et industriel au fil du 20^{ème} siècle.

L'histoire du LCA relève d'une autre dynamique, celle de la construction du complexe militaro-industriel français. Le versant constitué par la physique et l'industrie de l'atome, avec le CEA, a été l'objet de recherches approfondies, renouvelées⁶¹. Les instruments de la politique stratégique en matière d'armement, à travers la DGA et la DRME ont été étudiés⁶². Mais le Laboratoire lui-même dans ses pratiques, sa sociologie et sa longue histoire reste une zone d'ombre. Entrer dans l'histoire de ces deux structures permettrait de mieux saisir la dialectique entre le local des savoirs et savoir-faire métrologiques, le national avec ses impératifs d'une structure opérationnelle et le global métrologique des normes et traités internationaux.

B. Les acteurs de l'Institut national de métrologie : exemple de la photométrie au Cnam

Dans le volume 3 des *Cahiers d'histoire du Cnam* (nouvelle formule, 1^{er} semestre 2015), rassemblant les contributions sur le sujet de l'histoire croisée de la métrologie et du Cnam, la volonté était de produire des documents utiles pour l'histoire, une matière première partant des

⁵⁹ En particulier le modèle incarné par la DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency.

⁶⁰ Dans ses travaux, Martina Schiavon a soigneusement décrit l'histoire des débuts du Laboratoire d'essai : (Schiavon 2014).

⁶¹ (Belot 2015).

⁶² (Pestre 2010; Duclert 2004; Duclert et Chatriot 2012).

acteurs vivants de cette histoire. D'où le choix de travailler sur une micro-histoire de l'INM à travers des entretiens, et un travail d'accompagnement différencié.

1. Le travail avec les acteurs

Parmi les acteurs interrogés, nous avons retenu André Allisy, Michel Lecollinet et Jean Bastie. Pour le premier, ancien titulaire de la chaire de Métrologie, la démarche a été celle d'un entretien simplement édité et publié dans le volume. Cette mémoire a d'ores et déjà servi d'archive pour l'écriture de la biographie d'A. Allisy (décédé en 2017) prévue dans le futur *Dictionnaire des professeurs du Cnam*⁶³. Pour M. Lecollinet, enseignant dans cette même chaire, je ne souhaitais pas limiter l'exercice à un entretien, et je l'ai accompagné dans la production d'un texte synthétique traduisant le projet pédagogique de la chaire de Métrologie (1967-1990) assorti de recherches dans les archives.

Enfin, avec J. Bastie, le travail a pris la forme d'un travail collaboratif et plus approfondi. La modestie du personnage masque le travail considérable qui a été le sien : construire de toute pièce une recherche fondamentale en photométrie au sein de l'INM. La mise en récit donne à voir les temporalités très longues de la métrologie, le savoir-faire instrumental hors norme mis en œuvre dans les instruments conçus successivement et la valeur cardinale de la précision dans l'exercice. Il convenait de resituer ces travaux dans le temps long de la photométrie au Cnam. L'exercice est proprement impossible sans l'ingénieur-concepteur lui-même, contraint lui aussi à faire l'effort de reconstruction des cheminements de ses recherches, en évitant la téléologie et la sur-rationalisation du processus. Nous avons profité de ces travaux avec J. Bastie pour élaborer un inventaire des instruments de photométrie conservés au Musée. Malheureusement, pour l'heure ce travail a dû se limiter à une sélection, classification et documentation de quelques artefacts. Cela m'a montré cependant la richesse des collections du Musée et constitue la matière à un article sur le sujet⁶⁴.

2. Au tournant de 1980 au Cnam : la chaire d'« Instrumentation numérique »

En déroulant le fil des archives du Cnam concernant l'INM et la métrologie, j'ai croisé la trajectoire d'un autre protagoniste, professeur de la chaire d'« Instrumentation scientifique » (1982-1996) Claude Morillon. Ce n'est pas tant son rôle de directeur de l'INM, ni la place qu'il occupe durant la nouvelle restructuration de la métrologie autour de 1990 qui a attiré mon attention, que le moment d'élaboration et d'attribution de sa chaire au tournant de 1980. Le projet de la chaire initialement intitulée « Instrumentation numérique » est décidé en 1981 par un Conseil d'administration renouvelé et à l'occasion du départ à la retraite du titulaire de la chaire de Physique dans ses rapports à l'industrie (André Fournier). Le débat est révélateur du carrefour que représente le Cnam à ce moment-là : lieu de rencontre des acteurs des transformations technico-industrielles « numériques », vues comme une convergence essentiellement technologique entre électronique et informatique, et réceptacle des demandes du monde socio-économique pour préparer l'industrie à ces nouveaux enjeux, allant jusqu'à l'automatique et la robotique. Le sujet de l'instrumentation est central, expliquant le rapprochement avec l'INM, par l'entremise d'A. Allisy, aboutissant au recrutement de C.

⁶³ Voir annexe, page 331.

⁶⁴ Ce n'est pas le cas de tous les domaines techniques au Musée. En matière de photométrie les collections conservent plusieurs jalons, depuis les lampes étalon Violle (1893), photomètres du 19^{ème} siècle (Mascart, Becquerel, Cornu...) jusqu'à certaines réalisations du LNE-Cnam des années 1950-60.

Morillon sur un projet ambitieux de développement de recherches, d'enseignements et de formation aux nouveaux modes de conception des instruments numériques. Cette seule citation de son dossier de candidature en 1982 indique les convergences que cache le terme « instrumentation numérique » :

À l'ère de l'ordinateur et du microprocesseur, l'instrument scientifique doit être conçu dès l'abord, en tenant compte des possibilités de traitement numérique du signal et de contrôle automatique par commande numérique.⁶⁵

Ce qui était un détour dans les archives est devenu un cas d'étude, aux facettes nombreuses, et générateur de plusieurs perspectives de recherche en relation directe avec mes travaux antérieurs sur :

- l'histoire du Cnam, en résonance avec le sujet de l'informatique au Cnam ;
- les transformations plus globales de l'instrumentation scientifique, d'un point de vue historique et épistémologique ;
- l'histoire de la micro-informatique, dans son versant plus expérimental et en rapport avec les pratiques scientifiques.

J'ai présenté une ébauche de ces chantiers de recherche dans le séminaire « Histoire des sciences, histoire de l'innovation »⁶⁶ en mars 2015, étendue ensuite au congrès SHOT de 2016, dans la session du SIGCIS⁶⁷. Mon exposé « Le Cnam et le tournant de la micro-informatique 1970-1980 – Enjeux technoscientifiques, enjeux de société » faisait l'hypothèse d'un Cnam à la fois acteur des mutations de la « micro » et, simultanément, un point d'observation privilégié : c'est un lieu « où se font » et « où on pense » ces transformations. Le prisme du Cnam permet d'éclairer par la marge les débats du temps sur l'informatique et la société, du fait de l'originalité de son expertise perçue à travers trois exemples : la recherche sur l'instrumentation ; les débats portés par les Sciences de l'organisation concernant la question de la micro-informatique dans la société ; les développements liés aux « systèmes informatiques répartis », au sein du Laboratoire d'informatique en train de se construire au Cnam. Ce laboratoire est l'objet du programme de recherche « Hist.Pat.Info.Cnam » détaillé plus loin.

C. Développer un corpus numérique pour le Cnum

Historien travaillant au Cnam, il est naturel de suivre le travail considérable réalisé au sein du Cnum (Conservatoire numérique des arts et métiers) qui met en ligne et alimente une bibliothèque numérique consacrée à l'histoire des sciences et techniques, valorisant les fonds de la bibliothèque du Cnam. Depuis 2011, grâce à l'expertise du Cnum et son opérationnalité, j'ai eu l'opportunité de participer à la fabrication de ce corpus numérique. Je passerai sur les aspects techniques liés au processus de numérisation lui-même pour aborder plus précisément le travail d'accompagnement d'historien réalisé pour le Cnum, en relation avec mes recherches.

⁶⁵ Archives du Cnam, [Dossier C. Morillon, « Candidature à la Chaire » - Procès-verbal du Conseil d'Administration 1982].

⁶⁶ Séminaire organisé par David Aubin (professeur à l'Université Pierre et Marie Curie - IMJ-PRG) et Pascal Griset (professeur à l'Université Paris-Sorbonne), à l'ISCC (Institut des Sciences de la Communication du CNRS).

⁶⁷ La Society for the History of Technology chapeaute différents groupes (SIG) tel que le SIGCIS « Special Interest Group for Computers, Information and Society ». La thématique retenue pour le congrès de 2016 était « Convergence and Divergence ».

La première opération, réalisée en 2011 conjointement avec Pierre Cubaud (du laboratoire CEDRIC du Cnam), un des pilotes de la plateforme Cnum, a visé à la constitution d'un corpus représentatif des « Technologies de l'information et de la communication », avant 1930, partant du fonds de la bibliothèque. L'objectif était de donner un panorama des techniques de communication au 19^{ème} siècle et début 20^{ème} siècle : télégraphie, presse à grande diffusion, téléphonie, radio et cinéma. Initialement 186 ouvrages ont été sélectionnés et numérisés, le corpus a été complété depuis et contient 300 ouvrages (état⁶⁸ au 12 mai 2019). Pour comprendre ces temporalités de travail très longues, il faut souligner le travail technique considérable et soigneux particulier au Cnum qui aboutit à des modes de visualisation, de consultation et de recherche qui n'existent pas sur d'autres plateformes.

La seconde opération est le fruit d'un dépôt du Bureau ministériel de la métrologie, transformé en don en 2010 : le Cnam conserve désormais une collection importante d'ouvrages sur la métrologie, constituée de 1800 unités matérielles des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, ainsi que 312 volumes imprimés antérieurs à 1830 et 39 manuscrits. Si une partie des documents a été mise au catalogue de la bibliothèque, ils restaient « invisibles » pour la plupart des publics (chercheurs ou curieux). Le projet de numériser et valoriser ce fonds s'est mis en place en 2013, à la condition d'opérer une sélection dans l'ensemble des documents : étant donné le coût de la numérisation (moyens financiers, moyens humains, moyens techniques), seuls les documents utiles à la recherche historique sont mis en ligne.

J'ai pu mettre en place un groupe de travail et de consultation, entre le Musée, les responsables de collection, historiens de la métrologie et métrologues en activité. La première liste comptait 445 titres grossièrement divisés en 5 ensembles : « Monnaies », « Poids et mesures », « Réglementation », « Tables de concordance », « Révolution » et un lot de « Varia ». Pour assurer une cohérence de contenu, j'ai abouti à une sélection centrée sur la période « 1791 et la mise en place du système métrique en France ». La thématique est probante car le corpus contient beaucoup de documents relatifs à la mise en place du système issu de la Révolution française : des traités scientifiques, des décrets, des tables de conversion, etc. Un second sous-corpus se dégage de l'ensemble, sur la période 1875-1920 environ, significative car elle correspond à la mise en place de la « Convention du mètre » et des grandes réglementations internationales. Pour former un ensemble plus étoffé, ce lot a été agrégé à une série de manuscrits de la Convention du mètre qui se trouvent dans le fonds des manuscrits de la bibliothèque du Cnam. Le lot a été envoyé à la numérisation en Juillet 2016 et intègre désormais pleinement le Cnum⁶⁹.

V. L'institutionnalisation de l'informatique au Cnam : machines, pratiques, discipline (2014-2019)

L'histoire de l'informatique a longtemps constitué dans mes recherches un point de récurrence sans être un sujet complètement central : le calcul scientifique et les instruments pour la visualisation de la dynamique sont en relation directe avec les évolutions des

⁶⁸ Les ouvrages sont consultables sur le site du Cnum :

[URL : http://cnum.cnam.fr/thematiques/fr/6.technologies_de_l_information/cata_auteurs.php consulté le 21/02/2019].

⁶⁹ La consultation sur la plateforme passe par la rubrique « Machines et instrumentation scientifique ».

technologies informatiques, et l'ordinateur est constitutif des évolutions contemporaines des sciences et techniques. Au sein du laboratoire HT2S, cet aspect de mes recherches a rencontré la trajectoire de recherche de Camille Paloque-Berges, recrutée en 2012, et qui est une des meilleures spécialistes de l'histoire des réseaux informatiques. À travers ce filtre des réseaux informatiques, elle avait pu documenter et analyser la petite communauté des « unixiens » du Cnam, qui ont été pionniers des réseaux UUCP puis Internet en France⁷⁰.

L'opportunité de développer une recherche sur l'histoire de l'institutionnalisation de l'informatique au Cnam s'est dessinée en deux temps. Dans un premier temps il s'agissait de faire de la « discipline » Informatique un sujet du programme de recherche élaboré au laboratoire HT2S sur la « Légitimation des savoirs » (2014-2015). Puis élaborer conjointement avec Camille Paloque-Berges un programme de recherche autonome, soumis dans le cadre du Labex Hastec et financé au titre des « Opérations scientifiques du Labex » sur la période 2016-2018 : « Hist.Pat.Info.Cnam » acronyme de « Histoire et patrimoine de l'informatique au Cnam »⁷¹.

A. Le programme de recherche « Hist.Pat.Info.Cnam »

Le programme est fondé au départ sur une historiographie assez lacunaire montrant une institution Cnam à la fois pionnière et actrice des sciences et des techniques du numérique depuis 1950, mais qui n'a développé une activité de recherche en informatique que tardivement⁷². La création d'un laboratoire d'informatique, le Centre d'Etudes et de Recherches en Informatique et Communications (CEDRIC) date de 1988 alors que : dès les années 1950, François-Henri Raymond, pionnier de l'industrie des ordinateurs en France⁷³, animait des travaux en Automatique ; que le Département de Mathématiques était piloté par Alexis Hocquenghem, très tourné sur les mathématiques appliquées ; et que les constructeurs d'ordinateurs (Bull en particulier) frappaient à la porte du Cnam pour développer des formations professionnelles sur le sujet.

Au-delà de ce paradoxe, quel rôle le Cnam a-t-il pu jouer dans l'émergence et la diffusion des sciences et techniques du numérique ? En quoi leur développement porte-t-il un projet social et politique en lien avec la tradition de recherche, développement et formation techniques du Cnam ?

Le programme a été inscrit dans la problématique plus générale de l'institutionnalisation scientifique de l'informatique en France : comment l'informatique, domaine hétérogène et fortement lié à l'industrie, est-elle devenue une discipline d'enseignement et de recherche ? Cette question est abordée par le biais de l'histoire des institutions de sciences et techniques, appuyée par la notion de « projet » scientifique d'établissement⁷⁴. Le Cnam ayant un projet

⁷⁰ UUCP (Unix to Unix Copy Protocol) est une communauté de spécialistes des systèmes informatiques. Ces travaux ont été publiés depuis (Paloque-Bergès 2017).

⁷¹ Archives du programme et activités du séminaire HIC se trouvent en partie en ligne : [URL : <http://technique-societe.cnam.fr/recherche/programmes-et-projets/hist-pat-infocnam-725347.kjsp> consulté le 20/02/2019]

⁷² Par rapport à l'ouverture des premiers laboratoires de recherche du domaine à l'université et l'ouverture d'une section Sciences pour l'ingénieur où figure l'informatique au CRNS en 1975 (Ramunni 1995).

⁷³ (Pierre Mounier-Kuhn 2010).

⁷⁴ Nous entendons par « projet » des « ensembles constitués d'orientations idéologiques, d'idées, de discours et aussi de dispositifs juridiques ou matériels, de pratiques ou d'habitude » comme le propose Michel Grossetti pour

tourné vers l'industrie, il est un lieu d'observation idéal pour interroger la fabrication de cette discipline en pratique, et la penser à travers les conditions de son inscription et de son institutionnalisation dans les structures d'un grand établissement.

« Hist.Pat.Info.Cnam » s'est inscrit en poursuite du programme de recherche interdisciplinaire « Légitimations du savoir : le rôle des techniques dans la construction sociale des savoirs légitimes » qui visait à réfléchir aux instruments et opérations techniques supportant les processus de construction des savoirs⁷⁵. Le programme se focalisait sur le rôle social et politique des techniques matérielles et intellectuelles, les modes et régimes de la pensée opératoire dans la légitimation des savoirs scientifiques, organisationnels ou plus informels, le tout analysé dans une perspective comparative : les modes d'institutionnalisation de l'informatique sont devenus une thématique de recherche au cœur de ce programme.

Notre programme de recherche « Hist.Pat.Info.Cnam » a été élaboré comme une double opération scientifique et de valorisation qui vise à retracer comment l'informatique est devenue un domaine légitime de recherche au sein du Cnam, en amont de la création du CEDRIC en 1988. Si le premier temps des recherches a été centré sur la genèse de ce laboratoire (2016-2017), il a été élargi à l'histoire des « systèmes informatiques », en mettant l'accent sur l'histoire sociale et épistémologique des recherches en informatique liées aux machines et systèmes « Unix ».

Le programme a engagé des recherches en archives et dans un processus de recueil de la parole des acteurs et témoins vivants de cette histoire. D'un point de vue historiographique, la perspective engagée est prosopographique et micro-historique, en perspective avec une analyse institutionnelle : il s'agissait de retracer les parcours scientifiques des acteurs clefs, et des collectifs engagés, en se fondant sur leurs publications et réseaux socio-professionnels, et les conditions institutionnelles dans lesquelles ils travaillent.

Le projet articule des recherches historiques avec le développement d'un système numérique de gestion documentaire de données bibliographiques et d'archives. La recherche historique accompagnée et amplifiée par l'outil informatique s'est donnée pour tâche de rendre accessible et de penser des savoirs en construction et en circulation, de comprendre leur processus de légitimation, dans le temps et dans différents espaces et institutions, en les mettant en rapport avec les idéologies, stratégies et croyances des acteurs du projet de laboratoire. D'un point de vue d'informatique documentaire, il permettra de tester des outils liés au Web des données, visant à créer un corpus bibliographique et à l'analyser.

L'équipe « Hist.Pat.Info.Cnam », copilotée par Camille Paloque-Bergès et moi-même, rassemble plusieurs historiens de l'informatique en France et associe des spécialistes de l'informatique documentaire :

- Isabelle Astic (Musée des arts et métiers) et Pierre Mounier-Kuhn (CNRS- Centre Roland Mounier) qui constituent l'équipe du séminaire « Histoire de l'informatique et de la société numérique » au Musée des arts et métiers ;

définir deux types d'institutions scientifiques académiques (l'un tourné vers l'industrie, le second vers la « science pour la science ») - (Grossetti 2004).

⁷⁵ Le programme est piloté par le laboratoire Histoire des Technosciences en Société (HT2S, Cnam), en partenariat avec les laboratoires DICEN-IDF (Cnam), le Centre d'Histoire des Techniques (CH2ST, Paris 1) et l'Ecole supérieure de commerce de Paris (ESCP Europe), sous le patronage du LabEx HASTEC (Pres HESAM).

- Cédric Neumann (HT2S, Cnam), qui a réalisé une thèse importante en 2013 intitulée « De la mécanographie à l'informatique : les relations entre catégorisation des techniques, groupes professionnels et transformations des savoirs managériaux »⁷⁶ ;
- Claudine Fontanon (CAK, EHESS), historienne, spécialiste de l'histoire des ingénieurs et des mathématiques appliquées ;
- Pierre-Henri Cubaud (CEDRIC, Cnam), Raphaël Fournier (CEDRIC, Cnam) et Gérard Kembellec (DICEN-IdF, Cnam) – spécialistes de l'informatique documentaire.

B. Le processus d'institutionnalisation de l'informatique au Cnam

1. Premier état historiographique – 2016

Sur une historiographie morcelée le texte de synthèse et de clarification écrit avec Cédric Neumann et Camille Paloque-Bergès en 2016 a permis de dresser un état des lieux des connaissances sur l'histoire de l'informatique au Cnam, reposant sur les travaux des trois auteurs⁷⁷. Cette synthèse présente les grandes étapes et les enjeux associés à cette évolution, depuis l'entrée de l'informatique dans l'établissement par le biais des formations organisées avec les constructeurs de matériels mécanographiques dès les années 1950, jusqu'à sa structuration en domaines et lieux différenciés : départements, chaires, services auxiliaires, et pour finir par la création d'un laboratoire dédié, le CEDRIC.

La période d'institutionnalisation se construit à travers trois trajectoires : scientifique (des mathématiques appliquées à la programmation), matérielle (l'électronique et la technologie des ordinateurs), organisationnelle (comptabilité, informatique de gestion, sciences de l'organisation). Le texte montre ensuite les alliances, négociations et reconfigurations entre les acteurs et entre ces trajectoires : l'informatique, sujet d'enseignement, devient moyen et sujet d'expérimentations, préliminaire à la structuration moderne de la discipline au Cnam. Au fil des années 1970-1980, la formalisation administrative des aspects formation, recherche et logistique, liés au domaine informatique, témoigne d'une institutionnalisation qui fait écho à la structuration du champ des sciences et des techniques plus largement.

2. Documenter le processus

Pour se développer, le programme « Hist.Pat.Info.Cnam » a construit un séminaire « Histoire de l'informatique au Cnam » (HIC)⁷⁸ sur l'année 2016, autour de l'analyse de la légitimation des nouveaux savoirs techniques au cœur des institutions. En phase plus avancée du programme, nous avons mis en place deux colloques importants dans le paysage français de la recherche en histoire de l'informatique⁷⁹ :

- Le colloque sur « *Systèmes d'exploitation : un tournant dans l'histoire de l'informatique* » - 15 novembre 2016
- Le colloque international « *Unix en France et en Europe : diffusion, appropriation, innovation* » - 19 Octobre 2017

⁷⁶ (Cédric Neumann 2013).

⁷⁷ « Le Cnam : un lieu d'accueil, de débat et d'institutionnalisation pour les sciences et techniques de l'informatique », (Cédric Neumann, Petitgirard et Paloque-Bergès 2016). Voir le *Recueil des publications*.

⁷⁸ Programme 2016 en ligne : [URL : <http://technique-societe.cnam.fr/recherche/programmes-et-projets/hist-pat-infocnam-725347.kjsp> consulté le 20/02/2019].

⁷⁹ Organisé par Camille Paloque-Bergès et Loïc Petitgirard, en co-organisation avec le séminaire « Histoire de l'informatique et de la société numérique » du Musée des arts et métiers. Voir les programmes en annexe, page 321.

L’outillage documentaire principal est bien sûr le corpus d’archives hétérogène qui a fondé nos analyses. Deux sous-corpus ont été élaborés prioritairement et mobilisés dans ces analyses : les publications scientifiques du collectif « Équipe Système » en évolution, permettant de qualifier la dynamique scientifique à l’œuvre ; un corpus bibliographique de tous les mémoires d’ingénieurs Cnam sur la période étendue (1968-1990) pour situer la place des ingénieurs à différentes échelles.

L’ambition de la collaboration avec l’équipe d’informatique documentaire est de dépasser ce stade pour accéder à une modélisation et un développement d’une plateforme d’archivage numérique des documents historiques avec une attention particulière portée à leur valorisation par la visualisation : publications et bibliographies, mémoires d’ingénieurs, archives administratives et documents divers recueillis au fil du temps. Le nœud de la collaboration interdisciplinaire réside dans l’identification et la définition des « entités » qui constituent le système et leur modélisation propre à rendre compte des dynamiques historiques. Dans ce cas les « entités » du système à considérer doivent refléter la diversité de la production documentaire : à côté des auteurs individuels se trouvent des groupes informels de chercheurs, des équipes, des structures institutionnelles, des revues, etc. Ainsi un collectif d’auteurs a pu prendre un nom *ad hoc*, Cornafion⁸⁰, pour la publication de l’ouvrage *Systèmes informatiques répartis* en 1981. Les relations que les entités collectives entretiennent entre elles ont été modélisées et plusieurs cartes heuristiques synthétisent ces faisceaux de relations. Charge aujourd’hui à l’équipe d’informaticiens d’achever la numérisation, l’organisation des données sur la base de cette modélisation, et de mettre en œuvre ladite plateforme⁸¹. La suite du travail, à nouveau en interdisciplinarité, sera organisée en plusieurs étapes : l’intégration de documents très hétérogènes, dont des notices d’objets informatiques, en l’occurrence des ordinateurs, matériels et logiciels ; leur mise en relation ; l’enrichissement des données documentaires en lien avec d’autres données sur le Web ; la création d’une interface de visualisation par chronologie interactive.

3. La recherche-expérimentation sur les systèmes : des pivots dans l’histoire de l’informatique

Fruit du programme « Hist.Pat.Info.Cnam » le double numéro des *Cahiers d’histoire du Cnam* intitulé « La recherche sur les systèmes : des pivots dans l’histoire de l’informatique », co-édité avec Camille Paloque-Bergès, rassemble une série de contributions de natures diverses. Le sujet de l’histoire des « systèmes informatiques » étant encore embryonnaire en 2016, nous avons fait le choix d’associer des points de vue d’informaticiens, d’acteurs de l’histoire d’Unix et d’historiens, dans les colloques. La sélection publiée⁸² reflète ce parti pris. Le double numéro a donc été l’occasion de publier les résultats inédits du

⁸⁰ Ce qui rappelle d’autres collectifs, comme Bourbaki. (Cornafion 1981).

⁸¹ Le choix s’est porté sur Omeka, plateforme open source, répandue dans la communauté et d’administration assez aisée. Seule une version de la plateforme est accessible en interne au Cnam, à l’adresse [URL : <http://163.173.230.26/omeka-2.4/> uniquement accessible depuis le site du Cnam]. Une ouverture plus large est prévue ultérieurement, lors de la mise en production.

⁸² Voir en annexe le sommaire des deux volumes, p. 326.

programme de recherche, d'ouvrir des perspectives de recherche et de donner matière à de nouvelles recherches.

Dans ce numéro, l'article écrit avec Camille Paloque-Bergès⁸³ fait une synthèse de l'analyse du processus de genèse scientifique et institutionnelle du laboratoire CEDRIC. Dans ce processus, dont l'analyse a porté sur deux décennies 1968-1988, la période 1975-1980 est marquée par l'émergence d'une cohérence de recherches autour des systèmes informatiques et d'un groupe baptisé « Équipe Systèmes ». Agrégée autour de Claude Kaiser, principal animateur scientifique du groupe, l'équipe a un caractère informel et maintient une distance avec les structures hiérarchiques de l'établissement. Tout se construit en arrière-plan de la structure de support que constitue le « centre de calcul »⁸⁴. Le processus de formulation d'un programme de recherche mobilise différentes catégories d'acteurs très enclins à une forme d'expérimentalisme : chercheurs et apprentis-chercheurs, enseignants, ingénieurs en formation. L'équipe dirige des travaux de mémoires d'ingénieurs, mène des recherches en lien avec des contrats industriels et produit des publications d'ordre académique. La dynamique a été analysée dans ses modes d'organisation (interne au collectif et en rapport avec l'institution) à travers les négociations visant à la reconnaissance du collectif qui fondera le CEDRIC, pour comprendre comment elle influe en retour celle de l'établissement en matière d'équipement informatique.

Plusieurs trajectoires d'acteurs ont permis de compléter celle de Claude Kaiser (publiée sous forme d'un long entretien⁸⁵ en 2016) : les acteurs des chaires de Mathématiques appliquées dans les Trente Glorieuses (C. Fontanon), la « trajectoire de Paul Namian au Cnam » (C. Neumann). Le premier volume intègre la publication d'entretiens avec des acteurs de la constitution du CEDRIC (Gérard Florin et Vivianne Gal). Le second volume contient des contributions sur l'histoire des « systèmes informatiques » et l'histoire d'Unix, une analyse originale de l'historien de l'informatique Thomas Haigh et des regards d'anciens protagonistes de ces développements informatiques.

Avant de dresser un bilan et des perspectives sur ce deuxième axe correspondant aux recherches sur l'histoire du Cnam, il reste à faire état des projets plus directement liés aux pratiques pédagogiques, telles que je les ai développées au Cnam, depuis mon arrivée dans l'établissement : une partie d'entre-elles a en effet été nourrie par des travaux sur l'histoire de la pédagogie au Cnam.

VI. Recherche-action et innovation pédagogique (2005-2019)

Dans mes activités d'enseignement, et pour assurer un renouvellement des contenus et pratiques de formation, je développe depuis 2005 des dispositifs de formation expérimentaux en recherche-action, ayant pour cadre le Musée des arts et métiers. Ces recherches ont évolué en suivant la transformation du cadre institutionnel, avec la création du laboratoire HT2S et des cursus de formation orientés sur les STS prioritairement. Or le cadre des STS intègre pleinement la question des processus de médiation dans la pensée des rapports entre science, technique et

⁸³ « L'Équipe Systèmes (1975-1980) et la genèse de la recherche en informatique au Cnam », (Paloque-Berges et Petitgirard 2017). Voir *Recueil des publications*.

⁸⁴ Appelé aussi le « laboratoire d'informatique » : son nom était « centre de calcul » dans les années 1960 avant qu'il ne soit rattaché plus formellement aux informaticiens.

⁸⁵ (Paloque-Berges, Petitgirard et Neumann 2016).

société⁸⁶ : des formations qui ont pu être associées à la « diffusion de la culture scientifique et technique », dans un mode très vertical de diffusion des connaissances, s'articulent désormais autour des pratiques de médiation culturelle des sciences et techniques, dans une vision plus horizontale des rapports science-technique-société⁸⁷.

Dans cette synthèse, je présente seulement deux dispositifs récents : les « Ateliers de médiation numérique » (AMN) et la conception du Mooc « Fabriquer l'innovation ». Les Ateliers ont évolué au fil du temps depuis mes premières tentatives en 2010, et ils ont été formalisés et mis en comparaison avec plusieurs autres dispositifs de formation à l'occasion d'une recherche récente, en collaboration avec Alain Bernard (ESPE Créteil).

Le Mooc créé avec Gilles Garel (Cnam) est le produit d'un croisement disciplinaire d'une autre nature, entre histoire et gestion de l'innovation. Conçu en 2016, il est aussi un concentré de mon expérience de l'enseignement d'une histoire des techniques et de l'innovation prenant le Musée et ses collections pour support pédagogique.

Dans une perspective critique et réflexive, l'histoire de l'innovation pédagogique au Cnam est elle-même devenue un sujet d'analyse, depuis le co-encadrement d'un projet post-doctoral au Cnam sur le sujet (2013-2015)⁸⁸ - avec Samuel Hayat, recruté sur cette mission. Le point focal de cette collaboration a été l'étude de l'expérience TéléCnam (cours du Cnam télévisés sur les chaînes de l'ORTF entre 1967 et 1974) dont un versant consacré aux « mathématiques modernes » à la télévision. Notre analyse se situe à l'intersection des recherches sur l'histoire du Cnam et des problématiques de recherche en cours sur l'histoire de l'audiovisuel pédagogique.

A. Dispositifs innovants pour la formation à la médiation culturelle des sciences et techniques – (2010-2017)

L'Atelier de Médiation Numérique (AMN) mis en place annuellement depuis 2010 dans le cadre du Magister « Sciences, techniques, société » au Cnam a beaucoup varié dans ses formes. Reposant sur une démarche inspirée du *design thinking* et s'appuyant sur les expériences de type Museomix, l'AMN vise plusieurs objectifs. Le premier est d'amener les étudiants à développer des prototypes de dispositif de médiation numérique à inscrire dans l'espace des collections permanentes du Musée. Ce prototype n'est pas une fin en soi, mais un prétexte et un moyen pour comprendre la démarche de conception en médiation, pour enseigner aux étudiants à élaborer des dispositifs de manière réflexive et collaborative et pour asseoir leurs compétences dans le domaine de l'histoire des sciences et techniques. Tous ces objectifs sont rendus possibles par différents moyens : les objets patrimoniaux et historiques du Musée sont au cœur de l'Atelier d'une part, et l'effort de réflexivité repose sur la mise en œuvre d'une documentation éditée de manière collaborative d'autre part.

Le processus pédagogique a été décrit et inscrit dans une « problématisation comparative » qui est issue de deux journées d'étude organisées au Cnam en 2015 et 2016, au croisement du programme « Légitimation » du laboratoire HT2S et du programme « Sciences

⁸⁶ Voir (Ruano-Borbalan 2017).

⁸⁷ Du modèle de « déficit » aux modèles visant à organiser un « dialogue » et une « co-construction » des savoirs, voir (Las Vergnas 2011).

⁸⁸ Dans le cadre du programme IDEFI Promising (Initiative d'Excellence en Formations Innovantes).

et techniques en Interférences » d'Alain Bernard⁸⁹. Cinq dispositifs de formation professionnelle développés dans des contextes et pour des publics *a priori* très différents ont été mis en comparaison : au sein du Cnam, en lien avec la formation à la médiation, l'AMN d'une part, et un atelier mobilisant « la culture ordinaire des sciences et techniques » en lien au dispositif « La Lucarne »⁹⁰, piloté par Michel Letté d'autre part ; le projet MEDFILM développé à l'université de Strasbourg par Christian Bonah et ses collègues, en liaison avec plusieurs cours associés dont des formations professionnelles pour médecins ; un groupe « histoire et épistémologie » expérimenté depuis 2015-16 par Alain Bernard, Katalin Gosztanyi à l'IREM de Paris Nord en partenariat avec l'ESPE de Créteil, pour des enseignants en formation initiale ou continue ; enfin le dispositif éditorial mis en place par Muriel Guedj et ses collègues à l'université de Montpellier pour accompagner l'exposition « Regards croisés sur la lumière » organisée localement à l'occasion de l'Année Internationale de la Lumière, et qui implique des futurs enseignants.

L'enjeu de ces rencontres était à la fois pratique et théorique : d'un point de vue pratique, il s'agissait d'enrichir et renforcer chaque dispositif par la comparaison et la mutualisation de pratiques ; d'un point de vue théorique, il s'agissait de se donner les moyens de penser les enjeux fondamentaux communs à ces dispositifs. Car malgré la diversité évidente des contextes institutionnels, des publics d'étudiants et des professionnels concernés, des objets ou des objectifs de ces dispositifs, ces dispositifs partagent des points communs. Ils combinent en effet, d'une manière ou d'une autre, des objectifs de formation professionnelle, des démarches de recherche en histoire des sciences et des techniques sur des objets variés, enfin des dispositifs dialogiques permettant la confrontation réflexive des étudiants ou stagiaires entre eux et avec des experts. L'ensemble des contributions, incluant mes travaux sur l'AMN et leur mise en comparaison dans un texte de cadrage écrit avec A. Bernard, ont été publiées dans la revue *TREMA* en 2018⁹¹.

B. Le Mooc « Fabriquer l'innovation » (2016-2019) : entre histoire et gestion de l'innovation

L'expérience pédagogique du Mooc « Fabriquer l'innovation » a débuté avec un croisement disciplinaire rendu possible institutionnellement au Cnam, et l'inscription de cette expérience dans la politique de développement et de promotion des Mooc par l'établissement depuis 2014. J'insiste sur le fait que c'est un projet expérimental en même temps qu'un produit pédagogique multimédia et finalisé. L'objectif ici n'est pas de détailler la scénarisation pédagogique ni les contenus du Mooc, mais de donner à voir la réflexion interdisciplinaire qui fonde ce projet.

⁸⁹ Et dans le cadre de programmes soutenus par le Labex Hastec. La première Journée d'étude s'est tenue le 9 avril 2015 – « Dispositifs hybrides de négociation du savoir » et la seconde le 31 mars 2016 – « Articuler histoire des sciences et des techniques, formation de professionnels et édition en ligne : quels dispositifs hybrides, pour quels objets ? ». Le programme est en annexe, page 312.

⁹⁰ [URL : <http://ateliercst.hypotheses.org/> consulté le 21/04/2019]. L'atelier « La Lucarne » est, à son origine, un projet de recherche collaborative sur l'histoire socioculturelle des sciences et techniques, proposé en 2013 par Michel Letté, enseignant-chercheur du laboratoire HT2S-Cnam. Son objet est d'interroger la pertinence d'un regard, portant non plus sur la culture scientifique et technique, prescrite par les acteurs traditionnels de la médiation, mais sur la manifestation des imaginaires populaires pétris de sciences et de techniques. Voir également (Letté 2018).

⁹¹ (Bernard et Petitgirard 2018; Petitgirard 2018b). Voir *Recueil des publications*.

Le cœur du Mooc est la « fabrique » de l'innovation, c'est-à-dire une invitation à revisiter les processus de construction de l'innovation à travers le prisme des objets techniques. Le Mooc articule deux perspectives : celle du management de la conception innovante c'est-à-dire la fabrique de l'innovation au travers des rationalités et des dispositifs de gestion ; celle de l'analyse historique qui étudie les processus et les contextes d'émergence de l'innovation. Les objets techniques de l'histoire contemporaine sont au centre du Mooc parce qu'ils portent la trace des processus de création et de conception et qu'ils sont des marqueurs de transformations aussi bien techniques, économiques que sociales.

Le Mooc mobilise deux types d'objets :

1 - des objets qui n'existent plus que sous forme de collection patrimoniale, comme la machine à vapeur de la première révolution industrielle. Néanmoins avec les raisonnements de conception et les processus d'innovation afférents, replacés dans leur contexte historique, ces objets deviennent des supports pédagogiques très contemporains.

2 - des objets « lignées » c'est-à-dire des objets qui existent sous une forme ou une autre dans le système socio-technique du 21^{ème} siècle, même si nous avons en partie perdu leur mémoire originelle, comme la micro-informatique. C'est alors le travail historique, dans une perspective généalogique (la lignée de cet objet) et archéologique, qui permet de comprendre les processus de la fabrique de l'innovation.

Dans les deux cas, le Mooc part d'objets choisis pour illustrer le cheminement complexe qui a conduit à leur conception. L'archéologie des objets révèle les conditions dans lesquelles les innovations ont été rendues possibles, ou impossibles pour certaines, souhaitables, attendues ou parfois surprenantes. Les deux premières séries de cours sont construites sur des objets patrimoniaux, avec une historiographie incontestable : la machine à vapeur, emblème de l'innovation technique de la première révolution industrielle⁹² et un ensemble d'objets du Musée qui sont des préliminaires à l'avènement de lignées d'innovation⁹³. Les deux autres séries de cours sont élaborées sur la déconstruction du processus de conception de deux objets contemporains : le micro-ordinateur et le Minitel. Pour ce qui concerne l'histoire du Minitel, nous avons pu compter sur une historiographie solide et sur des échanges avec les spécialistes du sujet⁹⁴. En revanche, nous avons dû documenter et écrire les jalons d'une histoire du micro-ordinateur Micral (inventé en 1972) enrichie par la perspective des sciences de gestion : le processus a pu être réinscrit dans celui des usages du microprocesseur, dans l'évolution du système socio-technique à l'aube de l'ère numérique, dans les cultures industrielles et

⁹² L'objectif est d'articuler les innovations techniques de James Watt avec les innovations « managériales » du moment : l'organisation collective, la capacité à faire évoluer le système socio-technique, en créant de la valeur (pour un objet qui n'existait pas jusque-là) et un système de maintenance, de distribution, d'apprentissage et de construction de la confiance.

⁹³ Le fardier de Cugnot et l'avion d'Ader en sont des exemples emblématiques au Musée : ce sont des inventions qui n'ont pas pu trouver dans le contexte de l'époque, et avec des limites intrinsèques à leur conception, les conditions de leur diffusion. Pour montrer la récurrence de ce type d'inventions, qui ne sont pas des innovations mais qui apparaissent régulièrement dans tout système socio-technique, on s'appuie sur des objets hybrides, objet de patrimoine du Musée, exposés mais aussi « mis en réserves ».

⁹⁴ On ne détaille pas ici l'importante bibliographie qui a servi de base de ces cours. Nous nous sommes adjoint la collaboration des spécialistes que sont Pierre-Eric Mounier-Kuhn (CNRS) et Isabelle Astic (Musée des arts et métiers) sur la question de l'histoire de l'informatique, et Benjamin Thierry, Valérie Schafer et Julien Mailland sur l'histoire du Minitel.

organisationnelles qui vont de petites entreprises (comme R2E où Micral a été inventé) au géant de l'informatique IBM, promoteur du standard IBM PC dans les années 1980.

Au-delà de la finalisation d'un contenu pédagogique, la construction du Mooc a été une sorte de matrice d'une interaction entre histoire et gestion de l'innovation. Les sciences de gestion s'appuient depuis longtemps sur des études de cas historiques et l'analyse historique s'ouvre concomitamment aux notions issues de la gestion. Cette démarche conjointe, dont il est usage en histoire économique et industrielle par exemple, a été amplifiée ici sur le terrain de la gestion de l'innovation et ses notions : stratégies d'innovation, modes d'organisation, théorie de la conception, innovation réglée, innovation de « rupture », dominant design, etc. La confrontation étant nécessairement critique et véritablement heuristique, elle se poursuit sur d'autres projets de recherche en cours (voir ci-dessous).

C. Histoire(s) d'une expérience audiovisuelle pédagogique « TéléCnam » (2013-2019)

En accompagnant le projet post-doctoral sur l'histoire de l'innovation pédagogique au Cnam en 2013, j'ai pu prendre conscience de l'importance du sujet dans un établissement dont l'histoire est structurée par la formation technologique supérieure depuis ses origines⁹⁵. La réflexion, en collaboration avec Samuel Hayat, autour du dispositif TéléCnam a combiné deux problématiques de recherche : l'analyse de l'évolution des pratiques pédagogiques au Cnam sur la longue durée et les interrogations sur les modes de conception d'une expérimentation pédagogique télévisuelle pionnière dans la France des Trente Glorieuses. Ce cheminement dans l'histoire du Cnam, qui s'articule avec l'ensemble de mes travaux sur le sujet, a eu une vertu réflexive stimulante pour l'enseignant-chercheur que je suis.

Les réflexions ont donné lieu à une publication en 2014, dans les *Cahiers d'histoire du Cnam*, sous forme de remise en contexte d'un texte d'« acteur ». En effet Yves Chamont (ancien du service Image et Son du Cnam) avait réalisé un travail documentaire et archivistique redonnant corps au processus de conception de TéléCnam en interne à l'établissement de sa création en 1963 à son plein succès entre 1967 et 1971 jusqu'à sa fermeture en 1974. Mais loin d'être une aventure isolée, TéléCnam est le fruit d'une politique aux multiples acteurs sur le plan national tels que le Cnam, le gouvernement et le ministère de l'éducation, l'ORTF, et sous l'influence d'organisations internationales, comme l'Unesco. TéléCnam est le fruit d'une congruence entre ces volontés politiques plurielles et une identité d'établissement, des principes et des valeurs signifiés par sa devise « Omnes Docet Ubique ».

L'expérience TéléCnam se situe à l'articulation entre deux logiques internes au Cnam, deux idéaux-types (pour reprendre les termes introduits par S. Hayat), que sont l'instruction professionnelle et la formation diplômante. Dans le cadre du développement industriel des Trente Glorieuses, cela signifie à la fois assurer le « recyclage » des travailleurs et une diffusion élargie des connaissances scientifiques et techniques. C'est ce qui fonde conjointement l'ouverture sur un canal de l'ORTF et la création de groupes TéléCnam destinés à la formation professionnelle des travailleurs, dans les Centres Cnam en région, au sein même des entreprises et des collectivités. En se focalisant sur le cours de René Chenon, professeur du Cnam titulaire

⁹⁵ Samuel Hayat a produit un article de synthèse remarquable sur la question de la transmission des savoirs et des formes de légitimation de ces savoirs dans le cadre de la longue histoire du Cnam (19^{ème} – 20^{ème} siècle) : (Hayat 2017).

de la chaire de Mathématiques appliquées aux arts et métiers, nous avons mis en lumière les contraintes du système technique dans la réalisation de ce produit audiovisuel très expérimental et balbutiant dans ses formes, malgré son ouverture au plus grand nombre.

J'ai pu récemment remettre en perspective ces analyses du dispositif TéléCnam dans le colloque « Histoire de bobines : L'audiovisuel pédagogique ; Productions et usages au XX^{ème} siècle »⁹⁶, en novembre 2018. Les échanges m'ont donné l'opportunité d'inscrire plus sûrement l'expérience TéléCnam dans l'histoire des expériences audiovisuelles pédagogiques en France, et l'histoire de la télévision scolaire au sens large. Une des raisons qui a fondé ce colloque (et une précédente journée d'étude exploratoire en octobre 2017) était la mise au jour et la préservation d'un ensemble de bobines consacrées à l'enseignement des « mathématiques modernes », retrouvées dans l'ancienne École normale de Douai. Leur analyse jette un éclairage nouveau sur la réforme des mathématiques modernes dans le système éducatif français, avec son lot de controverses, et permet de mettre en comparaison des expériences de différents niveaux : élèves, formation des maîtres, et l'ouverture aux téléspectateurs de l'ORTF. L'enseignement des mathématiques dites « modernes » au Cnam et les raisons de son ouverture à la télévision prennent sens dans cette comparaison, ce qui m'a poussé à analyser plus finement aussi bien la forme que le contenu du cours de René Chenon « Introduction aux mathématiques modernes » télédiffusé en 1969. Le déroulement du cours montre tout le poids du scénario télévisuel, du contrat tacite entre l'enseignant et le réalisateur, avec ses ambiguïtés et ses non-dits. L'analyse montre que ce processus doit être envisagé à travers un trio pédagogique enseignant-réalisateur-élève et non plus simplement enseignant – élève : c'est ce qui rend compte des compromis entre l'ambition pédagogique de l'enseignant, sur un sujet abstrait et formel comme les mathématiques modernes, et les contraintes techniques d'un plateau qui n'est qu'une conversion d'un amphithéâtre de cours avec son tableau noir en studio de télévision. Les contributions à ce colloque paraîtront dans l'ouvrage collectif prévu aux Presses Universitaires du Septentrion, fin 2019.

VII. Bilan et perspectives

Ma trajectoire scientifique est sinueuse. Elle a pris quelques détours, mais les trois lignes de force détaillées ci-dessus structurent et donnent une cohérence à mon parcours, dont le caractère transversal devrait apparaître plus clairement et prendre tout son sens : transversalité qui m'a mené de l'élaboration des savoirs mathématiques aux objets de collection du Musée et leur matérialité ; transversalité des échelles d'analyse biographique, individuelle, collective, institutionnelle ; diversité des types d'analyse historique, épistémologique, microsociologique, jusqu'aux croisements avec les sciences de gestion, sciences de l'éducation, sciences de l'information et de la communication.

Le premier point, qui me situe entre l'analyse des savoirs formalisés et l'histoire matérielle de l'instrumentation, sera le sujet essentiel de la seconde partie du mémoire : proposer une analyse étendue des rapports entre les savoirs mathématiques et l'instrumentation, partant d'une étude de cas des « instruments de Fourier » pour donner matière à une typologie des rapports historiques entre mathématiques et instrumentation. Dans cette synthèse je me suis déjà appuyé sur les résultats de recherches antérieures (sur l'histoire du chaos, des pratiques du

⁹⁶ Co-organisé par Jean-François Grevet (Université d'Artois) et Thomas De Vittori (Université d'Artois) - (partenaires : ESPE Lille-Nord de France, LML, CREHS, CURAPP-ESS et CCEP). Colloque tenu à l'ESPE LNF-site de Douai, 20-21 novembre 2018.

non linéaire, des instruments de calcul et de visualisation) qui nourrissent ce projet et ont servi à esquisser des interrogations et des perspectives de travail.

A. Approches biographiques et institutionnelles

1. L'enquête biographique, outil historiographique

Le second aspect renvoie aux entrecroisements récurrents entre le biographique, le collectif et l'institutionnel, qui sont assez caractéristiques de mon approche transversale. Par exemple dans l'analyse de l'organisation institutionnelle de la métrologie nationale, j'ai utilisé le filtre de la redéfinition de la métrologie scientifique et des trajectoires de plusieurs acteurs, physiciens pour la plupart, au cœur de cette recomposition. Le suivi des trajectoires des « ingénieurs-mathématiciens » N. Minorsky et Th. Vogel, informe sur les nécessités et difficultés du franchissement des lignes disciplinaires, avec leur lot de complication dans leur légitimation académique. Dans l'analyse du processus d'institutionnalisation de l'informatique, et d'une discipline des « systèmes informatiques », au Cnam et à l'échelle nationale, on a mis en exergue les savoirs, les stratégies et les modes d'organisation des collectifs d'acteurs. J'ai pu indiquer les prolongements de ces recherches, tant dans une perspective biographique que monographique à l'exemple de l'histoire des laboratoires comme le LNE ou celui d'informatique du Cnam.

Mon inclination pour le biographique tient au fait qu'en histoire très contemporaine l'accès aux acteurs vivants est direct et elle résonne avec la place importante redonnée récemment à la biographie dans les sciences sociales, ce que Michael Rusin avait déjà qualifié de « tournant biographique »⁹⁷. L'enquête biographique est devenue un véritable outil historiographique, comme le démontrent d'ailleurs les cas d'étude présentés dans l'ouvrage collectif publié en 2012, *Les uns et les autres... Biographies et prosopographies en histoire des sciences*⁹⁸ ainsi que l'ouvrage *Méthode et histoire : quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?*⁹⁹ de 2013. Les récits biographiques ont la vertu d'affirmer les singularités d'une trajectoire ce qui pose des difficultés ensuite pour les inscrire dans des récits plus larges qui ne peuvent pas se penser comme des sommes de trajectoires individuelles. Le suivi de carrières et de trajectoires scientifiques de nombreux acteurs est aussi une leçon de perspectivisme : il est parfois déroutant de voir les contradictions dans les souvenirs et les interprétations croisés de plusieurs acteurs. La mise en cohérence de trajectoires biographiques qui s'entrecroisent est un enjeu historiographique et, pour reprendre les mots d'Anne Collinot, cette élucidation biographique produit à son tour des sources nouvelles¹⁰⁰.

Aujourd'hui la biographie sert de métaphore et d'heuristique dans les sciences sociales à une échelle inédite : biographie d'objets, biographie d'innovation ou « materials biographies »¹⁰¹. Cette perspective biographique permet de rendre lisible la conception de ces

⁹⁷ Dans l'ouvrage *The Turn To Biographical Methods In Social Science: Comparative Issues And Examples* (Chamberlayne, Bornat et Wengraf 2000).

⁹⁸ (Rollet et Nabonnand 2012).

⁹⁹ (Rey 2013).

¹⁰⁰ Dans son texte « L'enquête biographique pour comprendre l'émergence d'une discipline universitaire » dans (Rollet et Nabonnand 2012, p. 425).

¹⁰¹ Je fais référence à la conférence récente (4-5 mars 2019) tenue à la Maison Française d'Oxford : « Materials biographies at the crossroads between natural sciences and humanities ». [URL : <http://www.mfo.cnrs.fr/conference-biographies-of-materials-at-the-crossroads-btw-natural-sciences-humanities/> consulté le 10/05/2019].

objets, à la fois dans leur singularité et comme entrelacement du technique, de l'économique, du social. Mes travaux de recherche en cours, sur la biographie du micro-ordinateur Micral, illustrent cette orientation, marquée par une attention à la matérialité des objets techniques et des instruments. Nous en verrons un aperçu dans la seconde partie du mémoire.

Enfin, les travaux biographiques sont très directement en relation avec mon investissement dans les recherches sur l'histoire du Cnam. Engagés depuis 2012, mes travaux ont pris de l'ampleur au fil des deux projets de *Dictionnaire* et de *Cahiers d'histoire du Cnam*. Ils sont liés à la proximité avec les archives du Cnam et sa bibliothèque, qui sont encore à valoriser pleinement. Ils prennent une double perspective biographique et thématique.

2. Le *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam*

Les ressources et la matière à biographies sont conséquentes, elles alimentent le *Dictionnaire*, avec une publication à l'horizon 2020. J'inclus en annexe des éléments concernant l'état d'avancement du projet et surtout les notices en cours de rédaction ou achevées¹⁰². Ce volume étant centré sur le corps professoral entré au Cnam dans les Trente Glorieuses, la somme des notices donne déjà un tableau historiographique tout à fait inédit de l'établissement. À court terme il s'agit donc de terminer les notices de l'ensemble de ces professeurs, pour nourrir une analyse plus ample des transformations disciplinaires et institutionnelles, avec leurs enjeux, dont les plus évidents sont la massification de la formation professionnelle, la multiplication des spécialisations techniques, l'émergence de nouvelles technologies (électronique, chimie du plastique, sciences et techniques du nucléaire, etc.) et la dissociation du LNE qui représente près des deux tiers de la masse salariale du Cnam en 1960 et qui le « quitte » en 1978.

En parallèle, un fonds d'archives particulièrement fourni a été récemment versé au Cnam sur le mathématicien et professeur du Cnam André Sainte-Laguë (1882-1950)¹⁰³ : dossier personnel, correspondance, activité scientifique, activité politique et syndicale au sein de la « Confédération des travailleurs intellectuels », enseignements au Cnam (1927-1950). Ses travaux fondateurs en théorie des graphes, et la personnalité très riche de Sainte-Laguë, ont déjà suscité la curiosité et l'intérêt de plusieurs mathématiciens venus consulter ses archives¹⁰⁴. Le corpus est une matière première évidente pour un projet doctoral destiné à montrer toutes les facettes d'un personnage aux multiples engagements, accompagnant plusieurs transformations de la première moitié du 20^{ème} siècle : la politisation des savants, l'émergence de la figure sociale de l'intellectuel, l'essor de la vulgarisation et les évolutions de l'enseignement des mathématiques. La faisabilité évidente du projet permet de le dessiner en collaboration avec plusieurs collègues, en premier lieu Jenny Boucard (Centre François Viète) et avec l'appui et l'expertise de nombreux historiens et historiennes des mathématiques et de l'enseignement (David Aubin, Hélène Gispert, Renaud d'Enfert...).

3. Autour des *Cahiers d'histoire du Cnam*

Tous les projets sur l'histoire du Cnam auxquels je contribue sont articulés aujourd'hui avec les *Cahiers d'histoire du Cnam* dont je suis rédacteur en chef depuis 2016. Il s'agit là d'un

¹⁰² La liste des professeurs concernés est en annexe, page 328. Les notices déjà rédigées : André Allisy (page 331), Maurice Bellier (page 342), Jean Girerd (page 350), René Chenon (page 359).

¹⁰³ Donnée en 2016, par sa petite-fille.

¹⁰⁴ De professeurs du Cnam (François Dubois, Christophe Picouleau) à Martin Golumbic (Université d'Haïfa), Alain Zalmanski.

moyen de publication, une revue à comité de lecture avec des modes de fonctionnement académique classique, devenu instrument d'animation de recherches sur le sujet. La politique scientifique de la revue dépasse bien sûr ce seul sujet, puisqu'elle accueille des travaux non circonscrits au terrain du Cnam, en SHS, orientés sur l'histoire des sciences et techniques, et l'histoire sociale des institutions. Passée la période de mise sur pied d'une équipe rédactionnelle et fonctionnelle, avec dix numéros réalisés (2014-2018), l'ambition est aujourd'hui d'ouvrir plusieurs chantiers de recherche¹⁰⁵, dont je n'évoque que deux aspects ici. Le premier est celui de l'histoire des « mathématiques appliquées » au Cnam au fil du 20^{ème} siècle, circonscrit par les travaux récents sur l'histoire de l'informatique au Cnam, croisés avec quelques éléments historiographiques sur l'enseignement des mathématiques au Cnam¹⁰⁶ depuis le début du 19^{ème} siècle, et les trajectoires biographiques comme celle d'André Sainte-Laguë. Quelle place a été faite aux « mathématiques appliquées » au Cnam ? Quelles spécificités se dégagent de leur enseignement dans l'établissement ? Quelles articulations aux mondes professionnel, industriel, économique et social ? Ces interrogations rejoignent les trajectoires de l'institutionnalisation de l'informatique au Cnam, réactualisant celle qui fonde une partie de l'informatique sur le développement des mathématiques appliquées.

Le second chantier de recherche est une extension des travaux du projet « Hist.Pat.Info.Cnam » qui viserait l'analyse de la dynamique d'émergence des questions de technologies « micro », embrassant microprocesseur, micro-ordinateur et micro-informatique, au Cnam. Les recherches en périphérie de l'équipe Système, en parallèle de l'exploration du développement des sciences de l'organisation autour de Bruno Lussato (Professeur du Cnam et chantre de la micro-informatique appliquée à l'organisation de l'entreprise dès 1973) et de l'analyse des mutations autour de l'instrumentation numérique, avec les travaux de Claude Morillon, indiquent que les technologies « micro » ont été un sujet très tôt dans l'enceinte du Cnam. Dès 2015, en séminaire, j'ai présenté une ébauche d'analyse, à approfondir, en voulant montrer que le Cnam est à la fois acteur, lieu d'observation et de réflexion sur les transformations numériques contemporaines dès les années 1970.

B. Interdisciplinarité : histoire et gestion de l'innovation

Le dernier aspect de la transversalité de mon parcours tient à mes recherches interdisciplinaires partant de l'histoire. Le Mooc « Fabriquer l'innovation » a été la matrice d'une collaboration possible entre histoire et sciences de gestion autour des processus d'innovation et de création. C'est ce qui m'a poussé à entrer dans l'analyse du processus de conception du micro-ordinateur Micral à l'aide des outils de l'histoire de l'innovation et de la gestion de l'innovation.

Dans le Workshop « Histoire d'innovations. Regards industriels » organisé par Joëlle Forest, Céline Nguyen, Marianne Chouteau¹⁰⁷ en juin 2017, j'ai pu discuter une partie de mes réflexions entre histoire et gestion, en présentant l'analyse de la conception du micro-ordinateur Micral (1972-73) : « La culture technique comme adjuvant d'une rationalité créative ? L'exemple de l'invention du micro-ordinateur ». Le cadre de ce Workshop était celui de la chaire

¹⁰⁵ Brièvement, les autres chantiers vont de l'histoire du déploiement du Cnam dans les territoires et à l'étranger, en passant par les travaux sur « l'héritage et l'actualité » des travaux de Jean-Jacques Salomon (fondateur du Centre « Science- Technique – Société ») jusqu'à l'histoire des techniques de la documentation (vue à travers l'INTD-Cnam, Institut national des techniques documentaires).

¹⁰⁶ (Gispert 1995).

¹⁰⁷ Equipe « Sciences, techniques et société », INSA/Laboratoire S2HEP - Lyon 1.

« Ingénieurs ingénieux – Saint Gobain » de l’Institut Gaston Berger, dans laquelle se rencontrent l’histoire, les *Science and technology studies*, les sciences de l’ingénieur et les sciences de gestion. Ces croisements disciplinaires sont fondés sur la mise en exergue des processus de conception, prisme pour penser l’innovation. Il s’agit de prendre au sérieux la dimension créative de ces processus et de penser l’articulation entre une rationalité analytique et une forme de « rationalité créative ». Le sujet du Micral est devenu un cas d’étude donnant corps à une rationalité créative et l’expression d’une culture technique de l’électronique, avec la maîtrise technique et la rationalité analytique que cela sous-entend au tournant des années 1970. Cela m’est apparu une bonne manière de produire une véritable « biographie d’innovation »¹⁰⁸.

Dans la même perspective interdisciplinaire je développe avec Sylvain Lenfle (LIRSA-Cnam) une analyse du processus de conception du transistor au sein des Bell Labs, dans son versant technologique et organisationnel. Le processus entamé dans les années 1930 (développement des théories quantiques) abouti à deux inventions, deux transistors en décembre 1947 (transistor à pointe) et 1948 (transistor à jonction). Il se poursuit par l’industrialisation des composants électroniques et la synthèse d’une théorie complète des semi-conducteurs par William Shockley en 1950. Il existe une documentation et une littérature importante sur ces inventions, il n’est pas question de revisiter l’historiographie¹⁰⁹. En revanche le processus, très complexe et étalé dans le temps, est très peu formalisé et en fait très difficilement intelligible dans toutes ses multiples dimensions, à travers les descriptions existantes. D’où notre parti pris théorique de mobiliser une théorie de la conception devenue « classique » en gestion pour formaliser le raisonnement de conception lui-même : la théorie C-K¹¹⁰. Mais si on se tient à cette formalisation *a posteriori*, l’épaisseur historique du processus est quelque peu écrasée. Entre histoire et gestion, il s’agit donc d’introduire toutes les temporalités dans la formalisation du processus pour la corriger, ainsi que les dimensions organisationnelles, sociales et stratégiques d’un laboratoire aussi important que les Bell Labs. Tout ceci n’a rien de neutre eu égard au mode de formalisation par la théorie C-K. Une ébauche de résultats a été présentée au 11ème *SIG Design Theory* en janvier 2018 sous le titre « The invention of the transistor : revisiting the “magic month” through the prism of C/K design theory »¹¹¹. Matière à publication¹¹² et preuve que ces cas d’étude historique interdisciplinaire peuvent être fructueux et susceptibles de nourrir une réflexivité sur la fécondité de ces croisements.

¹⁰⁸ Voir *Recueil des publications*.

¹⁰⁹ Les travaux de Lilian Hoddeson font référence (Hoddeson et al. (eds.) 1992; Riordan et Hoddeson 1997; Riordan et Hoddeson 1998; Hoddeson et Daitch 2002) ainsi que (Ernest Braun et MacDonald 1978). Sur les Bell Labs, voir l’ouvrage récent : (Gertner 2013).

¹¹⁰ Abréviation de « Concept-Knowledge ». La théorie décrit le raisonnement de conception comme une interaction entre un espace de « Concepts » et un espace de « Knowledge » : des concepts sont élaborés par l’adjonction de connaissances, générant de nouvelles connaissances remises en jeu dans le processus de conception (le processus est constitué de disjonctions de concepts, conjonctions de connaissances, partitions dans l’espace des concepts, etc.). (Le Masson, Weil et Hatchuel 2014; Agogué et al. 2013).

¹¹¹ Special interest group in Design theory – Ecoles des Mines – 29-30 janvier 2018.

¹¹² Projet d’article avec S. Lenfle prévu pour un numéro thématique de la revue *Entreprises et Histoire* : « La conception un nouveau regard sur l’expertise : les enjeux du déplacement de la frontière de l’inconnu au connu » (publié à l’horizon 2020).

Partie 2

Pour une histoire des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle. Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument.

I. Introduction - Enjeux historiographiques et épistémologiques

Les instruments ont un rôle reconnu depuis longtemps dans les découvertes scientifiques et techniques, mais ils n'ont été réellement considérés comme décisifs dans l'élaboration des savoirs qu'à la faveur du renouvellement de l'épistémologie et de l'histoire des sciences et techniques de ces cinquante dernières années. Avec la perte de vitesse des conceptions positivistes, ils ont dépassé le rôle de simples auxiliaires¹ d'une recherche théorique et expérimentale, pour acquérir une certaine autonomie. Bachelard² pouvait les considérer comme des « théorèmes réifiés » et Koyré³ comme « la réalisation consciente d'une théorie », les recherches historiques et épistémologiques ont depuis montré à la fois la diversité des fonctions épistémiques des instruments scientifiques et la multiplicité de leurs rôles sociaux.

A. Instrumentation, matérialité et savoirs mathématiques

1. Retour aux matérialités ?

Le regain d'intérêt historiographique pour les instruments s'est inscrit dans ce qui a été qualifié de « tournant pragmatique » (années 1990) avec un accent porté sur les pratiques scientifiques et les modalités de l'expérimentation. Avec le « tournant matériel », dans les mêmes années, l'attention a été attirée sur tous les artefacts participant des processus scientifiques et techniques, dont les instruments ne sont qu'une variété⁴. Ce cadre théorique a permis de renouveler la perception et les rôles des acteurs, des lieux, des pratiques et donc les voies de l'élaboration des savoirs en contexte⁵.

Du côté des Musées, de la conservation et la valorisation du patrimoine, l'attention a été constante et soutenue depuis beaucoup plus longtemps – à l'image de l'encyclopédie très nourrie *Instruments of science : an historical encyclopedia*⁶ publiée en 1998. Mais une grande partie de ces travaux ont été ignorés des historiens des sciences et techniques⁷. La collaboration entre ces deux traditions académique et muséale, dans un « réengagement » global pour les

¹ L'instrument comme interface, ou comme « stratagème » parmi d'autres, pour reprendre le terme de (Moulin 1999).

² « [...] les instruments ne sont que des théories matérialisées. Il en sort des phénomènes qui portent de toutes parts la marque théorique », (Bachelard 1934, p. 15).

³ Pour Koyré les instruments sont l'« incarnation de la théorie dans le réel qui, seul, rend possible la constitution d'un savoir expérimental et la réduction du monde aux *numerus, pondus, mensura* », cité dans (Vignaux 1963, p. 47).

⁴ Dans l'ordre de l'analyse des cultures matérielles, on peut renvoyer au texte fondateur « Mind in matter : an introduction to material culture theory and method » (Prown 1982) et à (Daston (ed.) 2000; Daston (ed.) 2004; Werrett 2014).

⁵ Sans aucune exhaustivité, on citera parmi les ouvrages importants de ces courants de l'histoire, de la sociologie et de l'anthropologie des sciences et techniques, incorporant ces dimensions pratiques et matérielles, ceux d'Andrew Pickering (*Science as practice and culture* (Pickering (ed.) 1992), *The mangle of practice* (Pickering 1995)) et Peter Galison dans son analyse des cultures matérielles de la physique des particules dans *Image and Logic* (Galison 1997).

⁶ (Bud et Warner (eds.) 1998).

⁷ Certains ont pu considérer, comme le souligne L. Taub, que cette conservation est une préoccupation d'antiquaires (Taub 2011).

instruments, c'est le sens de l'appel⁸ de l'historienne et conservatrice du Musée Whipple (Cambridge- GB) Liba Taub en 2011.

Quelles leçons retenir de ce retour aux pratiques et aux matérialités ? Que les instruments ne sont pas des entités fixes dans le temps, qu'ils ont leur histoire : ils sont sans cesse améliorés et réparés, assemblés dans des systèmes instrumentaux, parfois détournés de leur usage initial et ils prennent des sens différents d'un contexte d'utilisation à l'autre. Le philosophe Davis Baird a fait remarquer que leur matérialité fait surface dans les activités de conception, d'entretien, de réparation des instruments – alors que cette matérialité semble s'effacer dès lors que l'instrument fonctionne. Il en a tiré des leçons épistémologiques en promouvant une épistémologie matérialiste des instruments qui réhabiliterait les « thing knowledge », les savoirs encapsulés dans les instruments, pour les mettre sur un pied d'égalité avec les savoirs théoriques dans l'épistémologie des sciences et techniques⁹. Les dimensions matérielles et technologiques de la science contemporaine ne seraient plus reléguées à la vérification ou à l'application de résultats théoriques, ni considérées comme de simples médiateurs entre l'esprit théorisant et la réalité. Les instruments sont pleinement constitutifs des savoirs scientifiques et ils peuvent même, dans certains cas, déterminer aussi bien les théories que les observations : l'analyse de Peter Galison de l'instrumentation pour la physique des particules en est l'exemple le plus révélateur.

Différents collectifs de concepteurs d'instruments, au 20^{ème} siècle, ont été soumis à l'analyse socio-historique montrant les modes d'organisation de communautés interdisciplinaires, leurs stratégies et leur positionnement interstitiel entre le monde académique, industriel, étatique, civil et militaire¹⁰. Le tout résonne avec l'hypothèse de D. Baird affirmant que le 20^{ème} siècle a été marqué par une « révolution de l'instrumentation » liée à la prise en compte, par les communautés scientifiques elles-mêmes, du caractère central des instruments conçus comme porteurs de savoirs scientifiques, et donc sujet sérieux et légitime de recherches scientifiques¹¹.

Ce tour d'horizon indique à quel point les savoirs scientifiques et techniques contemporains, qu'on peut qualifier de technoscientifiques¹², sont les produits d'une fabrique dans laquelle les artefacts techniques sont progressivement revenus au premier plan : les instruments, les systèmes expérimentaux, les modèles et les simulations¹³.

2. Pratiques mathématiques, savoirs mathématiques

Mais qu'en est-il lorsque les savoirs en question sont des savoirs mathématiques ? L'interrogation a deux versants : quel est le rôle des instruments dans la fabrique des savoirs mathématiques contemporains ? Quels savoirs mathématiques sont impliqués, embarqués,

⁸ « Reengaging with instruments » (*Ibid.*) – qui fait écho à un numéro d'*Osiris* de 1994 soulignant déjà l'importance du sujet, « Instruments in the History of science » : (van Helden et Hankins 1994).

⁹ L'ouvrage *Thing Knowledge : a philosophy of scientific instruments* de Davis Baird est un des plus remarquables sur l'épistémologie des instruments (Baird 2004).

¹⁰ Ces analyses ont par exemple dégagé les notions de « trading zone » de P. Galison, de communautés de « research-technology » de Terry Shinn et de « communautés instrumentales » au sens de Cyrus Mody. (Galison 1997; Shinn 2007; Mody 2011).

¹¹ (Baird 2004; Peter J.T. Morris (ed.) 2002).

¹² Pour signifier ici la consubstantialité contemporaine entre la production de savoir scientifique, les systèmes techniques, les systèmes économiques et les programmes politiques.

¹³ (Rheinberger 1997; Varenne 2007).

intégrés, encapsulés pour reprendre le terme de Baird, dans l'instrumentation au 20^{ème} siècle ? Poser cette double interrogation aujourd'hui, c'est souligner le manque d'intérêt pour ces savoirs dans les histoires de l'instrumentation, en dehors des travaux consacrés très spécifiquement aux « instruments mathématiques ». C'est aussi signifier que les historiens des mathématiques, s'ils ont pris récemment la chose au sérieux, sont loin d'avoir exploré la variété des rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation. Il n'est pas anodin de rappeler que l'histoire de la physique, de la chimie, des sciences de la vie, ou même des sciences considérées comme moins « empiriques » comme les sciences économiques ont été davantage préoccupées par l'analyse de leurs instruments, dans leur conception comme dans leur utilisation, à des échelles très variées de la *Big Science* des accélérateurs de particules à la diversité d'instruments de la paillasse, en passant par l'astronomie, les microscopies, la cartographie des géographes, les outils statistiques, etc.

La symétrie de l'interrogation indique qu'il s'agit de questionner dans un même mouvement les transformations de l'instrumentation et celles des mathématiques. La formulation de cette double interrogation sous-entend qu'il y aurait même peut-être une coévolution entre des savoirs mathématiques et certaines formes d'instrumentation. La formulation n'est donc pas neutre quant au statut des savoirs mathématiques. Elle suppose de s'interroger sur les évolutions des pratiques mathématiques, des modes d'élaboration des savoirs mathématiques, dans leur contexte. En ce sens, les interrogations prolongent un certain nombre de travaux récents d'histoire et de philosophie des mathématiques. Il s'agit en effet de faire nôtre et de poursuivre les perspectives historiographiques et philosophiques considérant les mathématiques non pas seulement comme théoriques et logiques, mais bien comme pratiques et instrumentales.

Les études actuelles sur les pratiques mathématiques, en philosophie des mathématiques, portent sur différents aspects comme la visualisation, le raisonnement diagrammatique, l'utilisation de l'ordinateur par les mathématiciens ou encore les rapports à la physique mathématique¹⁴. Ces travaux veillent à renouveler le cadre d'une philosophie des mathématiques marquée jusque-là par le fondationnalisme, c'est-à-dire la recherche de fondements certains aux mathématiques. Ils cherchent à inscrire les mathématiques dans une perspective anti-logiciste et anti-fondationnaliste : la logique mathématique n'est pas un outil adéquat d'analyse des mathématiques et de leur développement.

Cependant, l'attention de cette philosophie est encore trop attachée à ce que font les mathématiciens, dans des communautés qui se définissent comme mathématiciennes, à la différence des historiens et socio-anthropologues qui s'intéressent aux multiples praticiens des mathématiques, comme les physiciens, astronomes, ingénieurs civils et militaires, ce qui donne à voir la construction des savoirs mathématiques en contexte élargi¹⁵. Il s'agit de tenir compte de ce qui se joue dans ces communautés mathématiciennes, bien évidemment, mais aussi d'analyser les interfaces avec les autres savoirs, l'utilisation de savoirs mathématiques, les

¹⁴ Impossible d'indiquer de manière exhaustive tous les travaux récents sur le sujet, mais (Mancosu 2008; Van Kerkhove, De Vuyst et Van Bendegem (eds.) 2010) en donnent un excellent aperçu.

¹⁵ A ce sujet, les travaux de Dominique Tournès, Marie-José Durand-Richard, David Aubin, Maarten Bullynck, entre autres, seront convoqués à de multiples reprises au fil du mémoire, nous n'énumérerons pas ici la longue liste des publications correspondantes.

modes de circulation des savoirs mathématiques¹⁶ et, pour ce qui nous occupe ici, les rapports entre l'instrumentation et l'élaboration de savoirs mathématiques.

Ces perspectives ne sont pas tout à fait récentes, elles nourrissent les travaux des historiens des mathématiques appliquées, de l'analyse numérique, de l'ordinateur et de l'informatique. Marie-José Durand-Richard insiste par exemple depuis longtemps sur les relations suivies entre instrumentation et mathématiques, renforcées avec l'industrialisation au 19^{ème} siècle¹⁷. Le constat est renouvelé, à l'échelle d'une longue histoire des mathématiques, en 2018 dans l'ouvrage *Les mathématiques et le réel. Expériences, instruments, investigations* d'Evelyne Barbin, Dominique Bénard et Guillaume Moussard¹⁸.

Les analyses historiques et épistémologiques de systèmes analogiques ont souligné ces intrications mathématico-instrumentales : de l'emblématique analyseur-prédicteur de marées de William Thomson¹⁹ (Lord Kelvin) des années 1870, à l'analyseur différentiel de Vannevar Bush²⁰ (1930) et les machines construites sur ce modèle par Douglas R. Hartree²¹ (1935 et 1939). L'ouvrage de Charles Care *Technology for modelling*²² dresse un panorama des technologies et pratiques du calcul analogique entre le monde des ingénieurs et le monde académique. Nos travaux sur Nicolas Minorsky et Théodore Vogel ont mis en exergue des trajectoires d'« ingénieurs-mathématiciens » aux prises avec la conception d'instruments pour le calcul et la visualisation des oscillations non linéaires, sur la période 1920-1965²³.

Ces travaux sont congruents d'un autre chapitre de l'histoire des mathématiques, celui des rapports entre le monde des ingénieurs et celui des mathématiciens, vus dans différents contextes. Aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles, les ingénieurs ont été confrontés à des problèmes mathématiques redoutables dans des domaines aussi variés que le génie militaire (maritime, aéronautique, artillerie, balistique...), le génie civil, la mécanique, l'électricité industrielle, l'optique, l'étude des vibrations, etc. Ces questions qui concernent directement l'ingénieur ne peuvent pas être considérées simplement comme des champs d'applications de mathématiques toutes prêtes à l'emploi. Parallèlement aux terrains du physicien et de l'astronome, dont l'histoire est bien plus reconnue, le terrain de l'ingénieur est un lieu d'élaboration de savoirs mathématiques très adaptés à la résolution de problèmes du concret, qui dans certains cas nourrissent des travaux mathématiques de plus grande ampleur.

¹⁶ Notamment les périodiques, les revues spécialisées, dont le projet CIRMATH a montré toute l'importance [URL : <https://cirmath.hypotheses.org/> consulté le 16/03/2019].

¹⁷ Ses travaux récents (Durand-Richard 2013; Durand-Richard 2016).

¹⁸ « Le rôle des instruments dans l'histoire des mathématiques a été largement sous-estimé, y compris pour ce qui concerne l'histoire de la géométrie. Plus largement, nous avons été longtemps tributaires de la séparation aristotélécienne entre la technique qui est "poïétique", c'est-à-dire du côté de l'action, de la science, qui est "théorétique", c'est-à-dire du côté de la contemplation et de la spéculation. », (Barbin, Benard et Moussard 2018, p. 8).

¹⁹ (Durand-Richard 2013; Durand-Richard 2016).

²⁰ (Owens 1986; Puchta 1996). Voir également note 81.

²¹ (Durand-Richard 2013; Martinez 2017; Durand-Richard 2018).

²² (Care 2010). Les ouvrages (Small 2001; Mindell 2003) avaient montré que l'analogique constituait une réelle alternative au numérique, jusque dans les années 1970. Mais Care est plus convaincant sur les modes de coexistence technologique et même de coévolution dans les techniques et les usages de l'analogique et du digital, qui ne se sont pas toujours opposés. Voir le compte-rendu (Petitgirard 2018c).

²³ (Petitgirard 2015; Petitgirard 2018a).

De cette historiographie doit ressortir une grande leçon : bien plus qu'on ne l'imagine, des savoirs mathématiques sont élaborés dans d'autres domaines que le champ strict des mathématiques, dont les limites sont par ailleurs très fluctuantes au fil du temps. Ces savoirs sont construits, adaptés, raffinés, reconstruits, généralisés, transposés et ils circulent par des voies multiples²⁴. Tous ces processus sont le fait de mathématiciens, mais aussi de praticiens des mathématiques, des physiciens, des ingénieurs ou encore des économistes, pour ce qui a été analysé jusqu'à ce jour. Et il est important de s'intéresser aux interactions des mathématiques avec toutes les branches du savoir, tant ces interactions sont diverses. Si les études de cas sont nombreuses, bien peu relativement dépassent les années 1950, livrant un panorama tronqué de ces rapports sur le long 20^{ème} siècle et beaucoup trop polarisé sur les pratiques liées aux ordinateurs après 1950. La fragmentation croissante du savoir scientifique au 20^{ème} siècle et les mouvements de structuration de professions scientifiques toujours plus spécialisées compliquent évidemment ces investigations, indispensables mais qui deviennent tentaculaires.

B. La catégorie des instruments mathématiques et ses limites

Dans l'élaboration d'une réflexion sur les rapports entre l'instrumentation et les savoirs mathématiques, il faut évidemment se saisir de la catégorie des instruments mathématiques, tout en soulignant ses aspects problématiques. Cette catégorie est en effet très difficile à cerner dans sa globalité²⁵. Le rapport des savants, scientifiques et ingénieurs, à ce type d'instruments, et leur définition même comme instrument, varie beaucoup d'un contexte historique à l'autre, d'une culture scientifique, technique, mathématique à l'autre. Pour rester à un niveau très général, on peut y regrouper les instruments utilisés pour le calcul numérique, pour générer des objets géométriques, pour élaborer des solutions à des problèmes mathématiques, et inclure les moyens d'appliquer des mathématiques dans d'autres champs scientifiques.

Il a existé une tradition des instruments mathématiques, remontant à la période moderne, dont Jim Bennett a montré qu'ils sont une catégorie partagée par le monde académique, artisanal et commercial entre les 16^{ème} et 18^{ème} siècles : leur histoire est pratiquement indépendante d'autres dispositifs, à une époque où la notion d'instrument « scientifique » n'existait pas encore²⁶. Ils sont le reflet d'une pratique et d'une discipline qui se définit comme mathématique, appliquant des techniques géométriques aux arts mathématiques. Antérieurement, à l'époque médiévale, les instruments pour l'astronomie (astrolabes, quadrants, etc.) utilisant des propriétés géométriques pourraient aussi se ranger parmi ces instruments mathématiques. Il est bien difficile de retrouver une cohérence similaire dans l'époque contemporaine.

Certes, avec les transformations contemporaines, le développement et l'utilisation des instruments mathématiques ne se démentent pas : des systèmes graphiques ou mécaniques,

²⁴ En rapport au projet CIRMATH (voir note 16), on notera d'ailleurs que, sous l'impulsion de Dominique Tournès, un certain nombre de revues d'ingénieurs rentrent dans le corpus des journaux analysés, traduisant la production inédite et originale de savoirs mathématiques dans ces domaines.

²⁵ Le récent Workshop à la MFO-Oberwolfach (n° 1751 - 2017 – « Mathematical Instruments between Material Artifacts and Ideal Machines: Their Scientific and Social Role before 1950 ») consacré à ce sujet, et dont les conclusions inspirent nos analyses en partie, est convaincant quant à la pertinence du prisme des instruments mathématiques et révélateur des difficultés pour en fixer les limites et les catégoriser. Voir [URL : https://www.mfo.de/occasion/1751/www_view consulté le 16/03/2019].

²⁶ (Jim Bennett 2011). Sur la question de l'histoire des « instruments scientifiques » et fluctuations autour de ces catégories, nous renvoyons à l'article important de Deborah Warner « What is a scientific instrument, when did it become one, and why? » (Warner 1990).

jusqu'aux calculateurs mécaniques, puis électro-mécaniques du début du 20^{ème} siècle, un vaste ensemble d'instruments a permis aux savants, mathématiciens ou non, et aux ingénieurs d'étudier toute sorte d'objets mathématiques qu'ils soient des nombres, des courbes, des fonctions, de chercher des solutions aux équations algébriques et différentielles, d'imaginer des conjectures et de développer de nouvelles théories. Cette énumération indique que leurs fonctions reflètent les transformations de la discipline mathématique elle-même, avec ses nouvelles méthodes et objets : fonctions, équations différentielles, etc. L'élaboration d'outils mathématiques, de méthodes nouvelles, adaptés aux besoins croissants de l'ère industrielle et des problématiques concrètes des ingénieurs a modifié profondément les équilibres entre méthodes analytiques, numériques et graphiques. Dominique Tournès a montré que se trouvent là les racines d'une analyse numérique moderne²⁷ au 19^{ème} siècle, largement antérieure à l'analyse numérique de l'ère informatique, c'est-à-dire après 1945.

L'historiographie des instruments mathématiques donne à voir les rapports très anciens et bilatéraux entre instrumentation et savoirs mathématiques. Les réflexions associant de plus en plus historiens et spécialistes du patrimoine scientifique et technique, suggèrent également d'intégrer parmi ces instruments des artefacts « moins » matériels comme les diagrammes, les formalismes symboliques, les notations mathématiques et leurs inscriptions sur des supports²⁸. Le recoupement avec les études philosophiques sur les pratiques mathématiques telles que la visualisation, le raisonnement diagrammatique ou le recours à l'ordinateur, est évident et promet des réflexions communes stimulantes. Néanmoins, il n'est pas toujours facile de caractériser le type de savoirs mathématiques impliqués dans ces instruments, et statuer sur ce qu'il y a de « mathématique » dans les instruments mathématiques.

C. Les instruments mathématiques au 20^{ème} siècle

C'est dans les prolongements au 20^{ème} siècle que la catégorie des instruments mathématiques pose le plus de problèmes à nos yeux. D'abord parce que le siècle est marqué en son milieu par la conception de nouveaux instruments scientifiques : les ordinateurs. Ils sont le produit d'une convergence socio-disciplinaire accélérée par la seconde guerre mondiale, essentiellement entre la logique, l'électronique et la question du calcul. Ce « computer », ce calculateur électronique digital qui deviendra « ordinateur » dans l'acception française après 1955 ou encore « machine mathématique » dans le vocabulaire français des années 1950, peut se voir comme un instrument mathématique au sens où il est utilisé pour le calcul de tables de tir, le calcul cristallographique et le calcul scientifique intensif à ses débuts. Mais il devient rapidement un dispositif de simulation et une machine à traiter l'information mise sous forme binaire. C'est un outil d'investigation de phénomènes modélisés mathématiquement et un « substitut » de la nature, pour reprendre Peter Galison qui le formule ainsi : « In the baldest possible form : the computer began as a “tool”, an object for the manipulation of machines, objects and equations. But bit by bit (byte by byte), computer designers deconstructed the notion of a tool itself as the computer came to stand not for a tool, but for nature »²⁹. C'est ce qui

²⁷ Nous renvoyons à sa présentation synthétique de 2014 « Mathematics of engineers : elements for a new history of numerical analysis ». L'ensemble des travaux sur l'histoire de la nomographie, du calcul graphique et grapho-mécanique montre la diffusion de ses pratiques d'analyse numérique, bien avant les ordinateurs. (Tournès 2014; Tournès 2016).

²⁸ (Borrelli 2017).

²⁹ (Galison 1997, p. 777).

conduit au brouillage des catégories épistémologiques classiques théorie / instrument / expérience / observation.

Le cadre des instruments mathématiques est un peu étroit pour intégrer toutes ces fonctions et évolutions, même si les savoirs mathématiques sont essentiels au développement de l'ordinateur et son usage. L'analyse numérique, en premier lieu, devient indispensable et elle est recomposée pour servir le calcul sur ordinateurs dès 1947 avec un célèbre papier de H. Goldstine et J. von Neumann. L'informatique quant à elle veut se construire en discipline autonome, se distinguant des mathématiques, dès la fin des années 1960. Mais que penser alors de l'affirmation de l'informaticien et mathématicien Gilles Dowek de 2007 : « En 1976, les mathématiques sont entrées dans la période instrumentée de leur histoire. Les instruments utilisés par les mathématiciens, ne sont pas des instruments qui prolongent les facultés de nos sens, mais qui prolongent les capacités de notre entendement : notre faculté de raisonner et surtout, de calculer³⁰ » ? Dowek fait ici référence à la démonstration du théorème des quatre couleurs, assistée par ordinateur et publiée en 1976. Ces travaux ont alors divisé la communauté mathématique sur la question de la validité de la démonstration et ont marqué le début d'une utilisation massive de l'ordinateur pour assister et automatiser les démonstrations en mathématique. En tout cas l'affirmation veut indiquer une rupture et donne à penser que l'ordinateur est « devenu » un instrument pour les mathématiques. Pour les historiens, étant donné ce qui a été établi plus haut, l'affirmation semble faire table rase de toute l'histoire des instruments mathématiques et de leurs fonctions : plus qu'une rupture on a tendance à repérer des continuités avec l'histoire de l'instrumentation des mathématiques. Mais Dowek parle depuis la communauté des informaticiens et mathématiciens, et il adopte une perspective dans laquelle les mathématiques sont d'abord des raisonnements et des calculs, théoriques et abstraits. C'est donc un élément à intégrer comme tel dans nos analyses, indicateur des rapports complexes et évolutifs entre mathématiques et instrumentation.

L'émergence de l'ordinateur ne doit pas donner cette impression qu'il faut couper le 20^{ème} siècle en deux, entre un avant et un après l'ordinateur. L'histoire technologique de l'ordinateur ne se superpose pas à l'histoire des usages des instruments. C'est en retournant encore et toujours à l'analyse des pratiques scientifiques et techniques que des continuités se manifestent, à l'image de la longue histoire du calcul analogique³¹ ou du calcul graphique et grapho-mécanique³² : une historiographie beaucoup trop focalisée sur les calculateurs digitaux (perçus comme seuls ancêtres légitimes des ordinateurs) a longtemps occulté ces pratiques anciennes, très répandues dans le monde académique et industriel, et leur persistance jusque dans les années 1970. Or ces formes plus directes de descendance des instruments mathématiques, renouvelées dans leurs aspects matériels par l'électronique au 20^{ème} siècle, ne sauraient être évacuées de l'analyse.

Le second point problématique avec les instruments mathématiques tient à la pratique de la modélisation en expansion constante au 20^{ème} siècle. La modélisation formelle, mathématique, s'est imposée comme un instrument de conceptualisation dans tous les secteurs du champ scientifique, de l'ingénierie à l'économie. En creux, cela signifie une progressive dématérialisation des modèles utilisés dans le champ scientifique et technique, qui étaient pour l'essentiel mécaniques ou électriques, jusqu'au début du 20^{ème} siècle. La pratique de la

³⁰ (Dowek 2011, p. 182).

³¹ (Care 2010) Cf. note 22. Cette continuité ressort également de nos travaux sur Minorsky et Vogel.

³² (Durand-Richard 2019).

modélisation mathématique a été amplifiée par les moyens de calcul disponibles, qu'ils soient analogiques ou numériques, au 20^{ème} siècle. Le calcul analogique est en lui-même une technologie de modélisation et beaucoup de machines analogiques modélisaient non pas un système physique directement, mais des systèmes d'équations³³. On a dit que l'ordinateur s'est posé comme moyen d'expérimenter sur les modèles mathématiques très tôt dans son histoire, préliminaire à une extension massive de la simulation numérique des modèles. Pour reprendre les termes du philosophe Paul Humphreys, la computation étend le royaume des représentations mathématiques³⁴ offrant plus de flexibilité, un degré d'idéalisation plus faible, une grande précision des solutions numériques. Selon cette perspective il est tentant de classer la modélisation comme un « nouvel » instrument mathématique, comme méthodes et moyens, plus ou moins matériels, de représentation et d'appréhension du monde réel. Mais cela ne tient pas compte des multiples fonctions assurées par la modélisation et des transformations des rapports aux mathématiques – les travaux de Franck Varenne constituent à ce jour les meilleures analyses de ces transformations, nous en reprenons les grandes lignes³⁵.

En se formalisant, la modélisation a en effet pris progressivement de la distance avec le substrat physique qui constitue les systèmes à modéliser : il n'est pas toujours nécessaire d'en avoir une représentation pour les modéliser, à l'image des modèles statistiques ou des modèles de données. Ce faisant les formalismes mathématiques embarqués dans la modélisation se pluralisent et mobilisent les équations différentielles, la géométrie, l'algèbre, les processus probabilistes, les statistiques, etc. Plusieurs types de formalismes peuvent coexister dans un même modèle complexe.

Mais le rapport aux mathématiques change avec ce que F. Varenne qualifie de « tournant computationnel » en modélisation et simulation, avec la possibilité de faire des simulations directement sur ordinateur (des simulations algorithmiques ou des simulations informatiques qu'il faut dans ce cas distinguer des simulations numériques de modèles) selon des principes algorithmiques et de s'affranchir d'un modèle mathématique préalable. L'exemple le plus emblématique reste les automates cellulaires, des grilles de « cellules » formant un réseau d'automates programmés, un concept élaboré par Stanislaw Ulam et John von Neumann à la fin des années 1940. La modélisation mathématique, couplée à la simulation numérique, coexiste avec ces simulations informatiques, qui élargissent le spectre et le sens des pratiques de modélisation : les simulations informatiques peuvent reposer directement sur la richesse proposée par les langages informatiques, plutôt que sur des modélisations mathématiques préalables. Les ordinateurs sont au service de la formalisation mathématique dans le premier cas (simulation numérique de modèle), mais le rapport s'inverse dans le second : les mathématiques sont au service de la simulation informatique pour sa validation, sa calibration. Les mathématiques reviennent donc en deuxième intention, dans une perspective de remathématisation de résultats obtenus empiriquement par la simulation informatique.

Faut-il ranger toutes ces pratiques de modélisations et simulations (numériques et informatiques) dans les instruments mathématiques, en élargissant cette catégorie dont a vu la souplesse relative mais qui à force d'extension va perdre son caractère heuristique et sa cohérence ? Ou dans une catégorie complémentaire des instruments mathématiques ? Ces

³³ Ce que (Care 2010) appelle des « calculateurs analogiques indirects », à l'image des analyseurs différentiels (de Bush).

³⁴ (Humphreys 2007).

³⁵ (Varenne 2007).

interrogations traduisent un certain malaise par rapport à ces catégories et le flou quant aux notions même d'instrument, d'instrumentation et d'instruments mathématiques. De ce premier parcours dans les complexités des rapports entre instrumentation et savoirs mathématiques au 20^{ème} siècle, il faut retenir également que nos analyses devront porter aussi bien dans l'« avant » l'ordinateur, qu'à l'ère de l'ordinateur, que dans un « à côté » de l'ordinateur.

Une part notable de l'historiographie citée jusqu'ici reprend les termes des acteurs de l'histoire, chacun ayant une appréhension différente des notions, sans compter les variations selon les époques. Cette profusion de sens est trop peu discutée. Une clarification est de toute façon nécessaire pour mieux définir l'objet de nos réflexions. Nous venons de dire que les savoirs mathématiques sont mobilisés de manière très diversifiée. Cela pousse à s'interroger globalement sur les fonctions instrumentales des mathématiques, à condition de s'entendre sur ce que serait une fonction instrumentale.

En préalable à notre tentative de définition de catégories adéquates, il nous paraît important d'indiquer ce qu'elles devront respecter eu égard à ce qui a déjà été formulé. Les notions d'instrument et d'instrumentation sont relatives à des processus de conception, d'amélioration, de transformation, d'adaptation et de création de nouvelles fonctions et de nouveaux usages. Ce processus de conception nous paraît primordial parce qu'il constitue le nœud du rapport aux savoirs de toute nature, y compris mathématique. Il serait utile de conserver une catégorie d'instrument mathématique à la condition minimale d'en étendre les frontières, du matériel au « moins » matériel, aux méthodes, aux modes de représentations et aux modèles mathématiques.

Ajoutons qu'il nous paraît utile et même nécessaire maintenant de trouver des convergences avec le projet interdisciplinaire très prometteur engagé par Johannes Lenhard et Martin Carrier³⁶ (Université de Bielefeld) qui, partant d'analyses de pratiques mathématiques actuelles et associant l'histoire et la philosophie des mathématiques, structurent leurs interrogations autour d'une question centrale : peut-on penser les mathématiques « comme un outil » (« mathematics as a tool ») ? En un sens cette perspective s'inscrit dans une longue histoire des mathématiques remontant aux « mathématiques mixtes » du 18^{ème} siècle : dès que des méthodes mathématiques ont été utilisées dans d'autres contextes s'est posée la question de leur fonction instrumentale, suscitant en retour des interrogations sur l'unité des mathématiques et des réactions visant à faire des mathématiques un but « en soi ». À leur question centrale, Lenhard et Carrier choisissent de répondre par l'affirmative.

Mais Lenhard et Carrier ne définissent pas la notion de « tool » qu'ils utilisent. La traduction par « outil » est peut-être trop littérale, « tool » pouvant empiéter sur la notion d'« instrument » - mais sans discussion sur leur définition, là aussi le flou règne. Pour ordonner toutes nos réflexions, il nous semble nécessaire de poser des définitions des notions d'instrument, d'instrument mathématique et d'instrumentation, en parallèle de celles d'outil et d'artefact que nous mobiliserons ensuite très régulièrement.

³⁶ Leur ouvrage de 2017 contient une sorte de manifeste de cette perspective en philosophie des mathématiques (Lenhard et Carrier 2017).

D. Artefact, Outil, Instrument et Instrumentation – Quelques définitions

Il existe pléthore de définitions communes d'outil et d'instrument. Étymologiquement, « outil » vient d'« utensilia »³⁷, qui a donné ustensile, objet « nécessaire à un besoin ». « Instrument » est dérivé du latin « instruere »³⁸, chose qui sert à « équiper », à « arranger » et à « instruire ». Dans certaines définitions plus contemporaines, l'outil se caractérise comme objet ou moyen de transformer, et l'instrument comme moyen de capter de l'information, tel un instrument de mesure³⁹. Dans tous les cas, l'outil est un objet entrant dans un processus déterminé, avec une fonction donnée et un but précis : c'est la définition que nous conserverons.

D'autres définitions communes caractérisent l'instrument comme un objet doté d'une capacité d'action ou de transformation, mais il est destiné à faire, à créer, à exécuter ou à favoriser une opération⁴⁰. Un instrument peut mobiliser des outils. Même étendue et distinguée de la notion d'outil, celle d'instrument n'est cependant pas satisfaisante pour rendre compte des instruments contemporains, ni d'ailleurs des systèmes de type informatique.

Puisque nous voulons mettre en avant le processus de conception, il paraît judicieux d'impliquer le sujet concepteur dans les définitions. On peut trouver dans le domaine des recherches psycho-cognitives, dans les travaux de Pierre Rabardel en particulier, matière à analyser ces processus d'instrumentation⁴¹. Rabardel établit un premier distinguo entre artefact et instrument, partant d'une critique du fait que ce soit uniquement l'artefact (et même souvent sa partie matérielle exclusivement) qui est considéré comme l'instrument de manière explicite ou implicite. La notion d'artefact qu'il retient, vient de l'anthropologie :

*La notion d'artefact désigne en anthropologie toute chose ayant subi une transformation, même minime, d'origine humaine [...]. Elle présente, d'autre part, l'avantage de ne pas restreindre la signification aux choses matérielles (du monde physique) en comprenant sans difficulté les systèmes symboliques qui peuvent aussi être des instruments. Elle est enfin voisine du terme anglo-saxon et se prête ainsi mieux à la communication.*⁴²

³⁷ Source : Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL). [URL : <http://www.cnrtl.fr/> consulté le 6 avril 2019].

³⁸ Source : CNRTL.

³⁹ Gilbert Simondon, dans son célèbre ouvrage *Du mode d'existence des objets techniques* de 1958 a élaboré une telle distinction par analogie avec les organes biologiques : l'outil effecteur prolonge et adapte les effecteurs organiques ; l'instrument prolonge et adapte les organes des sens (percepteur, capteur d'information). « [...] si l'on entend par outil l'objet technique qui permet de prolonger et d'armer le corps pour accomplir un geste, et par instrument l'objet technique qui permet de prolonger et d'adapter le corps pour obtenir une meilleure perception ; l'instrument est outil de perception. Certains objets techniques sont à la fois des outils et des instruments, mais on peut les dénommer outils ou instruments selon la prédominance de la fonction active ou de la fonction perceptive. » (Simondon 1958, p. 114; Barthélémy 2015).

⁴⁰ Celle du corpus du CNRTL (Centre national de ressources textuelles et lexicales) : [URL : <http://www.cnrtl.fr/> consulté le 6 avril 2019].

⁴¹ Nous remercions vivement Dominique Tournès de nous avoir indiqué ces travaux et ainsi ouvert cette piste de réflexions sur les aspects psycho-cognitifs de l'instrumentation. Rabardel propose une extension de la méthode instrumentale de Vygotski (1931) : l'approche instrumentale, anthropocentrée, qui permet de comprendre comment se construit l'usage en situation d'artefacts devenus instruments pour les sujets. Ces travaux ont été utilisés avec succès en théorie des situations didactiques : comment les artefacts technologiques sont utilisés en classe de mathématique ; comment l'artefact conçu avec des intentions pour s'insérer dans des activités, est socialement négocié et que son développement comme instrument est en relation étroite avec les intentions et l'activité des acteurs. Voir (Trouche 2005; Aldon 2011).

⁴² (Rabardel 1995a, p. 49).

L'artefact peut être matériel ou « immatériel », voire combiner les deux par exemple pour des artefacts à dominante symbolique : des cartes, des graphiques, des abaques, les tables numériques. Rabardel impose la notion d'artefact au détriment de celle d'objet technique, car elle est plus neutre, plus générale et n'exclut pas les dimensions immatérielles. Nous utiliserons la notion d'artefact dans ce sens. Précisons immédiatement que la possibilité que des formalismes mathématiques soient considérés comme des artefacts « immatériels » joue un rôle déterminant dans ce choix.

À la suite, Rabardel élabore une définition de l'instrument comme artefact en situation, inscrit dans un usage, dans un rapport à l'action du sujet, en tant que moyen de celle-ci⁴³. L'instrument est considéré comme entité mixte entre un mode d'usage⁴⁴ et l'artefact, une entité bifaciale, un intermédiaire entre le sujet et l'objet⁴⁵. D'une part, l'instrument est un moyen qui permet la connaissance de l'objet, d'autre part il est moyen d'une action transformatrice dirigée vers l'objet. Les actions sont de natures très diverses : transformation d'un objet matériel, contrôle, régulation, prise de décision cognitive, interaction sémiotique avec un objet, etc.

Pour Rabardel, en aucun cas l'instrument n'est un donné, il doit être élaboré par le sujet dans un processus appelé « genèse instrumentale ». Ce passage de l'artefact à l'instrument est analysé comme un double processus d'« instrumentation » et d'« instrumentalisation »⁴⁶ :

- L'instrumentation est relative au sujet et correspond à l'émergence et à l'évolution des modes d'usage et d'action instrumentée ;
- L'instrumentalisation est dirigée vers l'artefact : sélection, regroupement, production et institution de fonctions, détournements et catachrèses, attribution de propriétés, transformation de l'artefact, de sa structure, de son fonctionnement etc., jusqu'à la production intégrale de l'artefact par le sujet. L'instrumentalisation peut être définie comme un processus d'enrichissement des propriétés de l'artefact par le sujet.

On peut en tirer deux conséquences immédiates. D'une part, l'instrument est une entité en perpétuelle évolution, qui conserve et capitalise une expérience : on retrouve en un sens l'idée qu'un instrument « cristallise » de la connaissance – à la manière de Bachelard⁴⁷. D'autre part, en distinguant artefact, sujet et genèse instrumentale, on rejoint le fait que l'utilisateur contribue aussi à la conception des usages des artefacts, qu'il peut attribuer des fonctions aux artefacts, non anticipées ou non prévues par les concepteurs : dans des processus de catachrèse, l'utilisateur détourne la rationalité instrumentale théorique, telle qu'elle a pu être inscrite dans l'artefact. Ces processus de détournements et créations d'usages trouveront un écho très significatif dans les processus d'instrumentation numérique, à base d'électronique, et tout particulièrement avec le microprocesseur, artefact très ouvert en termes de fonctionnalités.

⁴³ (*Ibid.*).

⁴⁴ Appelé « schème » dans les termes de Rabardel. Le schème, vocabulaire emprunté à la psychologie, est l'organisation de l'activité, dans un but donné.

⁴⁵ (Rabardel 1995a, p. 72). Les deux dimensions sont fondamentalement indissociables. C'est une entité intermédiaire, un moyen terme, entre le sujet, acteur, utilisateur de l'instrument et l'objet sur lequel porte l'action. L'instrument est doublement adapté au sujet et à l'objet, une adaptation en termes de propriétés matérielles mais aussi cognitives et sémiotiques.

⁴⁶ Voir les détails donnés dans (Rabardel 1995b, p. 5; Rabardel 1995a, p. 111-114)

⁴⁷ Voir note 2.

Ces analyses constituent une heuristique pour élaborer des définitions utiles à notre propos, à condition d'écarter certains aspects trop psycho-cognitifs⁴⁸. Pour penser le processus de conception des instruments et les pratiques instrumentales, dans leur histoire, il nous semble particulièrement utile de conserver la distinction entre artefact et instrument. Dans un certain nombre de situations de genèse instrumentale, en les approchant par l'histoire, nous aurons en revanche besoin de simplifier et fusionner les notions d'« instrumentalisation » et d'« instrumentation » de Rabardel. C'est prendre volontairement la distinction de Rabardel à rebours, pour éviter de multiplier les ambiguïtés de langage d'une part, et pour en revenir, d'autre part, à des notions d'instrument et d'instrumentation un peu plus technologiques et moins psychologiques. Lorsque nous mobiliserons les notions d'« instrumentalisation » et d'« instrumentation », pour être plus explicites et précis, nous prendrons la précaution d'indiquer qu'il s'agit des notions « au sens de Rabardel ».

En d'autres termes, un instrument est une entité mixte artefact-mode d'usage, un moyen qui permet la connaissance de l'objet et moyen d'une action transformatrice de l'objet. L'instrumentation est le processus de genèse instrumentale, c'est-à-dire de conception des instruments, impliquant des savoirs, orienté par des objectifs, avec une fonction de connaissance et des usages. On ajoutera que la pratique de conception peut être individuelle ou collective, ce qui a plus de sens étant donné les communautés de conception des instruments scientifiques contemporains : le processus d'instrumentation est un processus social, avec ses jeux d'acteurs, et inscrit dans un contexte. De manière annexe, on pourrait intégrer dans l'instrumentation les moyens d'étalonner, tester, évaluer les instruments, mais ce n'est pas décisif ici. Ces définitions nous semblent adéquates d'autant plus qu'elles recouvrent les définitions plus technologiques actuelles de l'instrumentation scientifique, vue comme technique de conception de systèmes de commande, de mesure, d'action, en assemblant des instruments, des capteurs et des actionneurs.

Muni de ces définitions, il est plus aisé de rediscuter maintenant la catégorie des instruments mathématiques. Dans le mixte que constitue l'instrument entre un artefact et un mode d'usage, les savoirs mathématiques peuvent se loger à tous les niveaux. L'artefact peut receler la part de savoirs mathématiques de l'instrument : tables numériques, abaquages, diagrammes sont de tels artefacts, matériels puisque ce sont des transcriptions écrites, sur des supports papiers, bois, métal, etc. ; mais les formalismes mathématiques eux-mêmes sont aussi des artefacts « immatériels ». Dans ce second cas, les exemples sont innombrables : les équations différentielles pour élaborer les modélisations des systèmes dynamiques, la théorie des nombres qui structure la cryptographie, la théorie des jeux en économie, etc.

À un autre niveau, un instrument mathématique peut se caractériser par son objectif de connaissance mathématique, lorsqu'il s'agit de produire des savoirs mathématiques à partir d'un artefact, quel que soit la nature de cet artefact. La géométrie est le domaine par excellence – de la règle et du compas, instruments des constructions géométriques depuis l'Antiquité, jusqu'aux logiciels informatiques dédiés à la géométrie. Dans le moyen terme, on peut également faire un usage mathématique de l'artefact, comme moyen d'une opération mathématique, la plus évidente étant celle du calcul : dans cette catégorie se rangent les

⁴⁸ D'autant plus qu'il est très difficile d'avoir accès à la psychologie de l'utilisateur dans les études historiques hormis le cas éventuel d'une reconstitution d'un processus instrumental avec l'acteur sous « observation ».

instruments les plus anciens pour le calcul, les calculateurs analogiques plus contemporains et nos ordinateurs.

Analytiquement il est donc possible de distinguer trois types d'instruments mathématiques : ceux dont les mathématiques informent l'artefact ; ceux dont l'usage correspond à une opération mathématique ; ceux dont l'objectif est l'élaboration des savoirs mathématiques. Ces trois types ne sont pas exclusifs les uns des autres, puisque qu'un même instrument peut combiner plusieurs types. L'ordinateur rentre évidemment dans cette dernière catégorie, et il a une spécificité peu commune car il combine les trois aspects propres à ces instruments mathématiques : le support artéfactuel matériel est pétri de mathématiques ; l'ordinateur calcule, c'est sa fonction fondamentale et il sert même plusieurs opérations mathématiques à travers des algorithmes mathématiques ; enfin l'ordinateur permet de générer des connaissances mathématiques nouvelles, par le calcul, par la visualisation ou encore par le recours à des systèmes de démonstrations de théorèmes.

E. Peut-on considérer les mathématiques « comme instrument » ?

Fort de ces définitions on peut aussi en revenir aux fonctions instrumentales des mathématiques, en reprenant notre discussion de la perspective « mathematics as a tool » de Lenhard et Carrier. Reprenons avec eux la signification, les enjeux et les implications liés au fait de considérer les mathématiques « comme un outil », en précisant d'emblée que nous serons enclins, dans nos recherches, à considérer les « mathématiques comme instrument ». Cela signifie, en premier lieu, de prendre en compte le caractère actif des mathématiques, de mise en forme de savoirs, et ne pas se contenter de penser en termes d'applications passives de notions mathématiques dans les interactions avec les autres formes de savoir. C'est ce qui fonde le choix d'introduire une perspective « comme instrument », qui nous semble plus précise et plus féconde que la perspective « comme un outil » - et prendre donc les formalismes mathématiques comme artefacts et base d'une fonction instrumentale.

Considérer les mathématiques comme instrument c'est aussi acter des limites de la mathématisation du monde, pris au sens fort, qui a été une transformation épistémique majeure de la science dite moderne. Même les modélisations mathématiques toujours plus élaborées ne rendent pas compte de toutes les subtilités des systèmes concrets. Les théories du chaos ont fixé des horizons de prédictibilité mathématique pour les systèmes dynamiques, même s'ils sont de petite dimension. Trouver des solutions mathématiques pour les équations mises en jeu dans les modèles nécessite de recourir quasiment systématiquement à des approximations numériques.

N'est-il donc pas préférable de se recentrer sur les vertus instrumentales de la mathématisation, écartant toute prétention à dire le contenu ontologique du monde ? Et mettre en avant le fait que les formalismes mathématiques offrent des méthodes, des moyens pour caractériser toutes sortes de données, quelles que soient leur nature et leur origine, que leurs ressorts permettent de construire des liens entre des théories et des données, ce qui prend une saveur particulière au 21^{ème} siècle avec l'idée de « data-driven science ». Nous ne sommes pas loin de l'instrumentalisme promu par Pierre Duhem⁴⁹ et du conventionnalisme⁵⁰ à la manière d'Henri Poincaré : c'est parce qu'ils sont « commodes » qu'il faudrait retenir ces formalismes mathématiques. Penser les « mathématiques comme instrument », assumer donc la première

⁴⁹ Dans son ouvrage de 1908 *Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée* (« Sauvons les phénomènes » en est un titre alternatif) - (Duhem 1908).

⁵⁰ (Poincaré 1902; Poincaré 1904).

catégorie d'instruments mathématiques à base d'artefact immatériel, n'est donc pas tout à fait nouveau. Et cela a un coût pour le corpus des savoirs mathématiques. Selon Lenhard et Carrier leur développement ne serait pas guidé uniquement par une dynamique interne aux mathématiques, il échappe même à cette dynamique en grande partie, puisque l'horizon des problèmes serait fixé par les autres domaines, pour lesquels les mathématiques sont susceptibles d'apporter des solutions. L'adéquation de l'instrument à ces usages étant déterminant, les questions d'efficacité, d'opérationnalité, de précision sont primordiales et prennent le pas sur les questions habituelles de la philosophie des mathématiques (cohérence, preuve, déduction, etc.) : même si nous avons volontairement mis de côté la notion d'« instrumentalisation » de Rabardel, il s'agit bien ici du processus d'enrichissement de l'artefact pour assurer son adéquation au problème qui est mis en jeu. La valeur des savoirs mathématiques est déterminée par l'usage, elle serait contextuelle et provisoire.

La perspective instrumentale nous paraît très stimulante et elle nécessite d'être nourrie par l'étude de cas historiques nombreux. Une des contributions les plus éclairantes dans cet ordre d'idée vient de l'analyse de la culture des observatoires astronomiques au 19^{ème} siècle, par David Aubin⁵¹. Sur la base d'une analyse des pratiques mathématiques, des outils et instruments mobilisés, de leur rôle social et épistémique il affirme que, dans ce contexte : « [...] mathematics was therefore just another instrument in observatory scientists' panoply⁵² ». Il formalise ainsi une bonne partie des questions qui doivent se poser :

How far can the analogy between mathematics and tools or instruments go? Have the notions of care, improvements, maintenance, and fixes corresponding meanings as far as mathematical instruments are concerned? Did astronomers develop with regards to their mathematical instruments the same kind of personal attachment, intimate knowledge about the ins and outs, and attention to the life history of their most prized material instruments?⁵³

Si la perspective instrumentale doit être prise au sérieux, elle sous-entend tout ce lot de questionnements qu'il faudra transposer et généraliser à d'autres contextes, d'autres lieux, d'autres communautés instrumentales.

La perspective offre d'autres vertus, par exemple celle de pouvoir rediscuter la dichotomie entre mathématiques « pures » et « appliquées », qui a toujours été contestée et débattue. Les historiens ont établi que cette distinction est une construction entamée au 19^{ème} siècle, entérinée au 20^{ème} siècle par des journaux académiques, des institutions et des positions universitaires dédiés⁵⁴. Étant employée couramment depuis un siècle, il est difficile de s'en départir, mais ce ne devrait pas être une catégorie historiographique pertinente. En accord avec les réticences de José Ferreiros, il faudrait même pouvoir s'interdire d'utiliser ces catégories⁵⁵.

Dans le cadre d'une perspective instrumentale on peut néanmoins en reformuler les termes en articulant deux propositions : l'idée que les savoirs mathématiques émergent des recherches de solutions à des problèmes pratiques et concrets, d'une part, et l'affirmation que

⁵¹ (Aubin 2017) dans l'ouvrage de Lenhard et Carrier.

⁵² (Aubin 2009, p. 282).

⁵³ (Aubin 2017, p. 180).

⁵⁴ (Ferreiros 2013; Siegmund-Schultze 2013)

⁵⁵ « I share the view that the historian should not employ the category of “applied mathematics” as a properly historiographical one, although of course we should study its rise and the evolution as an actor's category. Even more, I tend to think that avoiding that category is a positive contribution to the philosophical understanding of mathematics. » (Ferreiros 2013, p. 726).

les savoirs mathématiques structurent les solutions pratiques et instrumentales, d'autre part. Ce sont deux aspects de la place des savoirs mathématiques dans la genèse instrumentale : au cœur de la conception de l'artefact qui est utilisé dans l'instrumentation et comme objectif de connaissance de l'instrument élaboré.

Pour reprendre les mots de Lenhard et Carrier : « Mathematics is no ready-made repository simply to be tapped. On the contrary, problems and the tools to their solution co-evolve »⁵⁶. Cette idée de coévolution des problèmes et des instruments (par extension de leurs « tools ») nous paraît très à propos et donne encore plus de sens à nos interrogations sur les rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation.

F. Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument

Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument : ce sont trois perspectives distinctes à explorer, comme variations sur les rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation au 20^{ème} siècle. Les perspectives se tiennent par la centralité de la question de l'instrumentation, mais se distinguent dans les artefacts qui en constituent les socles : des machines, des dispositifs électroniques, des simples outils ou encore des diagrammes dans le premier cas, mais des formalismes mathématiques dans le dernier.

1. Retour à l'instrumentation scientifique

Partant de l'état dressé des enjeux historiographiques et épistémologiques, notre première intention est d'explorer les deux premières perspectives simultanément. Il s'agit de continuer à explorer l'histoire des instruments mathématiques au 20^{ème} siècle, avec les catégories définies précédemment. En conséquence des trois types d'instruments mathématiques distingués, et face à la complexité et l'intrication croissantes des savoirs de différentes natures dans l'instrumentation au 20^{ème} siècle, il nous faut ouvrir la perspective à tous les instruments susceptibles d'encapsuler des savoirs mathématiques. Il s'agit donc de reconsidérer l'histoire de l'instrumentation scientifique, de la conception jusqu'à l'utilisation des instruments, au filtre des rapports aux savoirs mathématiques, en ouvrant très largement l'horizon des instruments candidats. Cela signifie opérer un véritable retour à l'instrumentation, avec ses pratiques et ses matérialités, ce qui a été le cheminement à l'échelle de toutes les analyses socio-historiques « matérialistes » du champ scientifique et technique, mais qui avait jusque-là eu tendance à considérer les savoirs mathématiques comme un peu à part.

Dans notre cheminement, nous en reviendrons évidemment aux ordinateurs et aux instruments de calcul, de toutes natures et inventés pour répondre à des objectifs pratiques variés. Calculer étant la fonction la plus évidente à associer à des savoirs mathématiques, il serait tentant de se focaliser sur le sujet. Mais les autres fonctions remplies par les instruments scientifiques sont des portes qu'il nous faudra ouvrir : mesurer, détecter, simuler, traiter les signaux, communiquer, commander, etc. À différents niveaux, pratiquement toutes ces fonctions intègrent des ressorts mathématiques au 20^{ème} siècle.

L'ambition d'un tel projet peut lui donner un caractère démesuré. Dans ce mémoire il ne s'agira certainement pas de se livrer à une enquête exhaustive, mais de suivre quelques fils

⁵⁶ (Lenhard et Carrier 2017, p. 6-7).

dans l'instrumentation contemporaine pour en montrer l'intérêt. Il s'agit finalement de poser un cadre général et définir au mieux un programme de recherches sur le long terme.

2. Pour une histoire des « instruments de Fourier »

Dans les parties II, III et IV qui suivent, nous examinerons l'histoire d'un ensemble d'instruments agrégés sous une bannière inventée pour l'occasion : les « instruments de Fourier ». Cette catégorie regroupe différents instruments ayant en commun de mobiliser des savoirs mathématiques de l'analyse harmonique qui est communément appelée analyse de Fourier et qui rassemble les théories des séries de Fourier, transformées de Fourier et leurs multiples applications. Ces savoirs mathématiques sont l'élément fédérateur de cette catégorie, on les retrouvera dans le processus de la conception et dans le fonctionnement des instruments.

Associer des savoirs et instruments au nom de Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) est évidemment problématique, puisque les travaux de Fourier remontent au début du 19^{ème} siècle, son plus célèbre traité étant publié en 1822, et que nous analysons des pratiques du 20^{ème} siècle. Mais pour ne pas créer de confusion avec les termes employés par les acteurs, d'une part, et parce que le nom de Fourier pour ce pan des savoirs mathématiques est d'actualité encore au 21^{ème} siècle, d'autre part, nous choisissons de le conserver.

On entrera donc dans l'instrumentation scientifique contemporaine par le biais d'un champ de savoirs mathématiques particulier. Tout repose sur l'hypothèse qu'il existe une histoire en partie commune entre ce champ de savoirs et l'instrumentation scientifique, hypothèse appuyée par un faisceau d'éléments historiographiques⁵⁷. Au début du 19^{ème} siècle Fourier a élaboré son « analyse spéciale » dans ses travaux de physique-mathématique sur la propagation de la chaleur. L'analyse spéciale, devenue analyse harmonique, a été élaborée tout au long du 19^{ème} siècle par les mathématiciens aussi bien que les physiciens. Sans que cela n'aboutisse au début du 20^{ème} siècle à un ensemble de savoirs figés, au contraire c'est un champ de savoirs mathématiques qui évolue énormément au 20^{ème} siècle, et les interactions avec les autres champs du savoir sont nombreux depuis toujours.

Nous analyserons plusieurs types d'instruments de Fourier, dans différents contextes et situations, pour caractériser les rapports entre l'analyse de Fourier et le développement instrumental, entre la conception des instruments et l'élaboration de savoirs afférents. Ces instruments relèvent du domaine de la « spectroscopie infra-rouge par transformée de Fourier » (partie II), de la « cristallographie par diffraction de rayons X » (partie III), et plus ponctuellement de l'« optique de Fourier ». La catégorie des instruments de Fourier peut aussi s'élargir et englober les systèmes qui sont destinés au traitement du signal utilisant les ressorts de l'analyse de Fourier. L'homogénéité de l'entrée par les savoirs mathématiques de Fourier conduit à une certaine hétérogénéité dans l'ensemble d'instruments concernés, distincts par les artefacts sur lesquels ils reposent : des artefacts immatériels constitués des savoirs mathématiques de l'analyse de Fourier et des artefacts matériels comme les spectroscopes, interféromètres ou diffractomètres. La catégorie des instruments de Fourier rassemble des instruments mathématiques de Fourier, des instruments électroniques de Fourier, des instruments optiques de Fourier, etc.

⁵⁷ La meilleure biographie de Fourier étant celle écrite en 1998 (Dhombres et Robert 1998). Pour une histoire mathématique des concepts de l'analyse harmonique, nous renvoyons aux nombreux travaux de Jean-Pierre Kahane et Jean-Paul Pier : (Kahane 2009; Kahane et Lemarié-Rieusset 1998; Pier 1990; Pier 1992).

Il existe une historiographie générale qui aborde la conception de ces instruments dans différents champs expérimentaux de la physique⁵⁸. Mais les rapports entre savoirs mathématiques, savoirs instrumentaux et conception des instruments sont peu analysés, et pourtant centraux. Dans la théorisation du fonctionnement des instruments, dans les problèmes de calcul effectif de transformée de Fourier pour obtenir des résultats expérimentaux interviennent aussi bien des algorithmes et des savoirs mathématiques que des systèmes matériels comme des calculateurs analogiques, des ordinateurs digitaux, certains spécifiques et d'autres plus génériques dans leurs usages. Les mathématiques de Fourier sont au cœur de l'évolution des fonctions et des effets épistémiques des instruments : c'est une coévolution des savoirs mathématiques et de l'instrumentation qu'il nous faudra caractériser.

Nous procéderons par cas d'études, certains étant en partie documentés et connus, d'autres non, pour les rapprocher, les comparer puis clarifier les rapports entre conception d'instrument et construction de savoirs. Même si leur préhistoire remonte au 19^{ème} siècle et qu'une première grande phase d'évolution se dessine avant 1920, nous nous focaliserons sur la période 1920-1970 qui est celle d'une généralisation en marche : les instruments de Fourier se multiplient dans plusieurs champs des sciences et techniques, non sans rapport les uns avec les autres. À partir du milieu des années 1960 l'algorithme de « Fast Fourier Transform » (FFT ou en français TFR pour Transformée de Fourier Rapide) annonce un tournant dans les usages et les modes de conception des instruments. Nous observerons des effets de convergence de l'instrumentation vers toujours plus de matérialité électronique numérique et une standardisation progressive de l'instrumentation mathématique embarquée dans les instruments : l'extension de ces trajectoires dans les années 1970 avec l'électronisation croissante des instruments sera l'objet de la partie suivante (partie V).

Dans ce mémoire nous livrerons des résultats de recherches en cours et esquisserons des lignes permettant d'écrire une histoire plus large des instruments de Fourier (parties II et III). C'est avant tout une matière première historique pour caractériser le rôle et la part des savoirs mathématiques dans l'élaboration de ces divers instruments, pour qualifier les fonctions épistémiques des mathématiques dans ces instruments. Nous voudrions contribuer à faire des instruments des « acteurs » du développement des savoirs mathématiques puisqu'un certain nombre de savoirs mathématiques sont produits spécifiquement pour les instruments et structurent les processus d'instrumentation. Ce faisant bon nombre de praticiens des mathématiques, physiciens et ingénieurs, n'endossent pas cette étiquette de producteurs de savoirs mathématiques. Tout ceci constituera une ébauche destinée à dresser autant de nouvelles perspectives de recherches, entre biographies d'acteurs et socio-histoires institutionnelles à écrire.

Enfin, étant donné la grande diffusion des instruments de Fourier dans les laboratoires scientifiques ou industriels, on pourra s'interroger sur les effets de cette propagation concomitante des instruments et des savoirs mathématiques par ce vecteur. Cela pourrait apporter un éclairage sur les discours constatant que l'analyse de Fourier est « partout » aujourd'hui, dans nos formats d'images informatiques, notre technologie Wi-fi et jusque dans nos téléphones portables, mais qui ne donnent aucune raison à cette omniprésence, autre que

⁵⁸ A titre indicatif, nous avons préparé l'entrée « Infrared spectroscopy », à paraître dans le volume *Tools in Materials Research* (Encyclopedia of the Development and History of Materials Science), dirigé par Cyrus Mody et Joseph D. Martin. Le texte se trouve en annexe de ce mémoire, p. 363.

faire le constat d'une révélation de la concordance presque trop parfaite entre ces mathématiques et les structures de notre monde.

En termes de sources et ressources pour nos analyses, nous nous reposons sur un corpus avant tout constitué de publications relatives aux instruments en question : traités, documentations techniques et articles publiés dans des revues scientifiques et techniques. Des archives institutionnelles viennent compléter ces ressources sur certains points précis. Mais s'agissant d'une première approche du sujet, nous avons procédé à une identification de ressources et non à leur dépouillement complet. Enfin, les collections d'instruments scientifiques instituées à l'heure actuelle sont de précieux réservoirs pour examiner les instruments directement : les collections du Musée du Cnam sont la première ressource utilisée, complétée par la base nationale concentrée par le réseau Patstec ; le *Science Museum* (Londres) et le *Deutsches Museum* (Münich) sont les deux autres collections qui ont été consultées. En rapport avec notre projet, il nous est apparu prioritaire de cibler des revues et d'entreprendre un dépouillement systématique pour cibler les instruments de Fourier, et surtout exhumer des instruments « oubliés ». Deux revues spécialisées sur les instruments tombent sous le sens : la *Review of scientific instruments* (sur la période 1930-1980) et le *Journal of scientific instruments* (sur la période 1927-1967)⁵⁹. Dans le registre de la spectroscopie (partie II) et de la cristallographie (partie III), les revues sont très nombreuses, nous avons privilégié : le *Journal of the Optical Society of America* (1930-1980), la *Revue d'optique théorique et instrumentale* (1922-1966), *Acta Crystallographica* (1948-1967)⁶⁰. Cet ensemble qui représente déjà un corpus considérable de littérature analysée, a été complété au gré des thématiques très ouvertes qui structurent le projet d'une histoire des instruments de Fourier, tel qu'il est présenté dans la partie IV.

3. Les transformations électroniques de l'instrumentation dans les années 1970

L'histoire des instruments au 20^{ème} siècle est traversée par des mutations électroniques d'ampleur et notre exploration de l'histoire des instruments de Fourier en aura donné un aperçu. L'ordinateur, toujours lui, est l'instrument scientifique électronique par excellence. Mais il n'est qu'un aspect d'une électronisation des instruments, modifiant un pan de la matérialité des instruments, permettant une automatisation croissante des instruments, et contribuant à la grande affaire de la mise en « boîte noire » des instruments. Toute personne qui visite des collections d'instruments scientifiques très contemporains est troublée par les similitudes d'apparence entre des instruments « boîtes noires » dont les fonctions sont pourtant différentes.

La partie V de ce mémoire constitue une ébauche de l'histoire des transformations électroniques de l'instrumentation dans les années 1970, période charnière de ces mutations. Nous donnerons trois perspectives sur cette histoire, volontairement recentrées sur le contexte français dans cette décennie. Une première part des revues professionnelles de l'électronique et l'informatique industrielle pour avoir une vision globale sur les transformations et leurs enjeux. Une deuxième perspective se concentre sur la conception d'un instrument en particulier, qui a

⁵⁹ La *RSI* est éditée par l'*Optical Society of America*. *JSI* est édité par l'*Institute of Physics and the Physical Society* (GB). *JSI* devient la section E du *Journal of Physics* après 1968.

⁶⁰ Le *JOSA* est édité par la société qui lui donne son nom, la *Revue d'optique* par l'*Institut d'optique théorique et appliquée*. *Acta Crystallographica* est rattaché à l'*Union internationale de cristallographie*.

une double facette, le système Micral : il est conçu dès le départ comme instrument automatisé spécialisé pour les mesures agronomiques⁶¹ et, simultanément, comme machine générique, qui est rentré dans l'histoire comme étant le premier micro-ordinateur à base de microprocesseur. À travers la trajectoire biographique et institutionnelle de Claude Morillon, professeur du Cnam sur la chaire d'« Instrumentation scientifique » en 1982, nous compléterons ces perspectives en indiquant les modes d'installation d'une méthode générale de conception des instruments à l'ère numérique, dépassant la décennie 1970.

Nous montrerons les relations permanentes entre la conception instrumentale, les savoirs mathématiques en jeu, et les matérialités électroniques en évolution, avec une « puce » en particulier : le microprocesseur. Ces transformations nécessitent une concordance de systèmes électroniques, associant le microprocesseur et des éléments tels que les convertisseurs analogique-numérique, des mathématiques de l'information et du traitement du signal, d'analyse numérique, d'algorithmique et d'informatique. En aucun cas cette transformation n'est pensable à l'aune d'une seule de ces composantes.

Ce sera l'esquisse d'un projet qui aura pour ambition d'analyser cette période charnière pour l'instrumentation, durant laquelle s'accélère le passage au numérique, à plus grande échelle. Le contexte français est un choix pragmatique, lié à des sources disponibles pour entrer dans le sujet, il est évidemment indispensable d'ouvrir sur des chantiers de recherche au-delà de ce contexte : des fabricants d'instruments (à l'image de Hewlett-Packard ou Varian), des laboratoires de recherche en Europe et aux États-Unis, des acteurs de la mini-informatique et micro-informatique. L'entrée par la question disciplinaire avec l'émergence du traitement numérique du signal, entre monde académique, industriel, civil et militaire, semble prometteuse. Somme toute, la difficulté n'est pas de trouver des sources, des protagonistes ou des lieux d'investigations, la difficulté est de déterminer quels sont les choix pertinents dans la multiplication de ces acteurs et lieux de l'instrumentation à l'ère numérique.

4. Des rapports entre instrumentation et savoirs mathématiques au 20^{ème} siècle.

La dernière partie VI aura deux ambitions. Nous pourrions en premier lieu établir un premier bilan global et provisoire sur notre approche historiographique et épistémologique. Il sera alors possible de dessiner de nouvelles perspectives de recherche pour progresser dans l'analyse des rapports entre l'instrumentation et les savoirs mathématiques au 20^{ème} siècle, avec pour horizon d'en faire une typologie. Les objectifs sont multiples, puisqu'il s'agira de continuer à élaborer notre cadre méthodologique, d'esquisser de nouvelles hypothèses à explorer, de circonscrire des chantiers de recherche suivant ces orientations. Pour parachever ce programme de recherches, nous articulerons ces propositions selon trois axes qui reformulent en partie les trois termes : les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument.

Le premier axe se construit sur une distinction supplémentaire à établir et à discuter entre les mathématiques « dans » les instruments et des mathématiques « pour » l'instrumentation. Le premier cas nous renvoie au processus d'encapsulage des savoirs mathématiques dans les instruments, le second aux modes d'encapsulages et modes d'usages des artefacts en situation. Pour alimenter ces analyses, et pour compléter nos études de cas préliminaires, nous chercherons à réinscrire différents travaux historiographiques dans notre perspective instrumentale. Le sujet des instruments mathématiques pour l'étude des systèmes

⁶¹ Pour l'INRA, Institut national de recherche agronomique.

dynamiques non linéaires, que nous avons eu l'occasion d'étudier depuis plusieurs années, en fera partie.

Le sujet du développement des instruments pour les mathématiques sera le deuxième axe retenu. On a vu dans cette introduction en quoi cette catégorie d'instruments mathématiques peut être sujette à controverses. De la longue histoire du calcul analogique aux moyens informatiques récents, les instruments pour les mathématiques prennent des formes très différentes, depuis les matérialités très mécaniques du début du siècle jusqu'aux matériels électroniques et aux logiciels informatiques. Pour nourrir ce deuxième axe de réflexions, nous entrerons brièvement dans la fabrique d'instruments mathématiques récents très directement conçus pour l'élaboration des savoirs mathématiques : les instruments mathématiques pour la démonstration automatique de théorèmes et les « mathematical softwares ».

Enfin, pour clore ce mémoire, nous ouvrirons à nouveau la discussion autour de la question : peut-on considérer les mathématiques « comme instrument » ? Les études de cas précédentes nous auront donné une matière historique sur le 20^{ème} siècle permettant d'élaborer quelques éléments de réponses. Elles sont également une incitation à élaborer une typologie des fonctions instrumentales qui ont été dévolues aux mathématiques. C'est en suivant le double processus d'instrumentation et d'instrumentalisation (au sens de Rabardel) des savoirs mathématiques, pris dans plusieurs situations et contextes, que nous pourrons ouvrir de nouvelles pistes de recherche quant aux modes d'usages et moyens mis en œuvre pour instrumenter des mathématiques. L'ensemble de ces perspectives alimentera nos réflexions sur les dynamiques contemporaines de développement et de diffusion des savoirs mathématiques, afin de rendre compte du caractère à la fois invisible, omniprésent et indispensable des mathématiques aujourd'hui.

II. La fabrique de la spectroscopie par transformée de Fourier (1949-1970)

Pour notre premier cas d'étude nous entrerons dans la fabrique de la spectroscopie par transformée de Fourier (FTS⁶²) et de la spectroscopie infra-rouge par transformée de Fourier très spécifiquement (FTIR⁶³). On peut s'appuyer sur une historiographie nourrie intégrant la longue histoire de la spectroscopie, des communautés instrumentales et de leurs horizons de recherche⁶⁴. Cette historiographie est très attachée aux acteurs, aux espaces, mais moins aux savoirs mathématiques : c'est par ce prisme que nous allons analyser les processus de conception des instruments.

Commençons par expliquer les enjeux propres à l'instrumentation en spectroscopie infra-rouge, pour faire ressortir ensuite en quoi ces instruments encapsulent des savoirs mathématiques en un sens pluriel : les savoirs mathématiques sont en jeu dans la conception des instruments, dans le développement de l'instrument, dans son fonctionnement et son utilisation.

A. Pourquoi s'intéresser à la spectroscopie infra-rouge par transformée de Fourier ?

1. Premiers jalons d'une histoire récente

La spectroscopie infra-rouge est un domaine historiquement lié à l'analyse de la physico-chimie des composés, à l'astronomie et la physique atomique. Le processus de conception des FTS dans l'infra-rouge n'est qu'une évolution récente au regard d'une histoire qui remonte au 19^{ème} siècle⁶⁵. Il s'étend sur la période 1949 – 1965, symboliques des 15 ans d'efforts nécessaires pour aboutir à un premier modèle, un prototype d'instrument performant et la réalisation de spectres de planètes d'une précision inégalée.

⁶² Acronyme du terme anglais équivalent, et beaucoup plus fréquent dans la littérature : Fourier Transform Spectroscopy.

⁶³ FTIR est l'abréviation de « Fourier Transform Infra-Red spectroscopy », terme très commun dans la littérature.

⁶⁴ On s'appuiera fortement sur les travaux de Sean Johnston, les plus documentés à ce jour : (Johnston 1990; Johnston 1991; Johnston 2001).

⁶⁵ Pour une perspective plus globale sur cette histoire, nous renvoyons à l'entrée « Infrared spectroscopy » que nous avons préparé pour le volume *Tools in Materials Research* (Encyclopedia of the Development and History of Materials Science), dirigé par Cyrus Mody et Joseph D. Martin. Le texte se trouve en annexe de ce mémoire, p. 363.



Figure 1 - Album de Tintin – L'étoile mystérieuse - Casterman, 1942, p. 11

L'année 1965 marque un tournant majeur avec le développement de l'algorithme de FFT « Fast Fourier Transform ». C'est un facteur d'économie dans l'instrumentation, dont on verra la portée très générale dans l'instrumentation par la suite, à travers l'accélération des transformations de l'analogique vers le numérique. Mais loin d'être un outil exogène, la mise au point des procédés efficaces de FFT ont été le fruit d'une collaboration entre certains membres de la communauté des physiciens de la FTIR, des mathématiciens et informaticiens. Cela signe une singularité de la FTIR dans l'histoire des instruments de Fourier, qui a bénéficié par ailleurs à d'autres instrumentations physiques, avec la circulation des algorithmes et des implémentations électroniques.

Dans les années 1970, la conception des instruments de FTIR repose toujours plus sur l'intégration de la microélectronique et de l'informatique (avec l'introduction des ordinateurs dans ce type d'instruments), des technologies elles-mêmes en cours de miniaturisation sur les années 1960-1980. L'aboutissement de ce cheminement est un instrument typique des années 1980, une « boîte noire », standardisé, peu cher, diffusé à des milliers d'exemplaires à travers le monde. La spectrométrie par transformée de Fourier est devenue progressivement un moyen générique pour étudier les composés chimiques, les liaisons chimiques, les propriétés physiques d'échantillon, jusqu'aux cellules et bactéries en biologie⁶⁶ : elle sert à dresser de manière automatique une sorte d'« empreinte digitale » d'un échantillon, indiquant sa composition physico-chimique. Analyser le processus d'incorporation des savoirs mathématiques dans ces instruments, de diffusion de ces savoirs et leur utilisation par des techniciens qui n'ont même plus besoin d'en connaître les ressorts, est bien un des enjeux majeurs de notre réflexion.

Si on en revient aux années 1950, la communauté qui développe la FTS est un collectif de taille réduite, qui peut se penser, en suivant T. Shinn et S. Johnston⁶⁷, comme un collectif de « recherche-technologie », inscrit dans les interstices entre monde académique et industriel. Au sein de cette communauté, nous nous focaliserons surtout sur un laboratoire, et une culture scientifique et technique particulière : le Laboratoire Aimé Cotton, fondé comme « Laboratoire du grand électro-aimant » par le physicien Aimé Cotton (1869-1951) en 1931. Ce choix est très clairement déterminé par l'accès aux acteurs, aux archives, aux données de ces recherches, bref

⁶⁶ Difficile d'être exhaustif tant la FTIR est devenue une technique courante des laboratoires scientifiques et industriels.

⁶⁷ (B. Joerges et Shinn 2001) et (Johnston 2001).

le matériau de base de l'analyse épistémologique et historique. Mais ce choix est d'autant plus intéressant que le laboratoire a été porteur d'innovations décisives dans le développement de la FTS, apportant les premières preuves de la faisabilité des instruments, d'une part, et la clarification des ressorts des mathématiques de Fourier dans ces instruments, d'autre part. À ce titre la trajectoire scientifique de Janine Connes, commencée dans le développement instrumental et sa théorisation, et basculant dans le calcul scientifique au CNRS mérite une attention toute particulière, et une place majeure dans l'historiographie des sciences et techniques en France.

2. La spectroscopie infra-rouge avant 1950... sans Fourier

La spectroscopie par transformée de Fourier germe sur une histoire, déjà longue, de la spectroscopie. La FTS rentre en compétition avec d'autres spectroscopes dans les années 1960 – pour lesquels existent déjà un marché et des constructeurs reconnus. Les premiers spectromètres infra-rouge, qui sont sans rivaux jusque dans les années 1960, reposent sur l'utilisation de systèmes dispersifs : fentes, prismes et réseaux de diffraction. Ce sont les artefacts optiques de ces instruments. Les détecteurs de ces instruments mesurent la quantité d'énergie émanant d'une source à analyser ou traversant l'échantillon à examiner, pour chaque fréquence infra-rouge. En reportant l'intensité mesurée pour chaque fréquence, on obtient le spectre de la source lumineuse ou le spectre de transmission de l'échantillon (voir un exemple Figure 2). Jusque dans les années 1960, ce sont les seuls systèmes opérationnels, du proche infra-rouge à l'infra-rouge lointain⁶⁸. Ces instruments sont lents, mécaniquement complexes, donc fragiles et délicats à utiliser, sans compter la faible sensibilité des mesures du fait de l'organe dispersif qui les constitue.

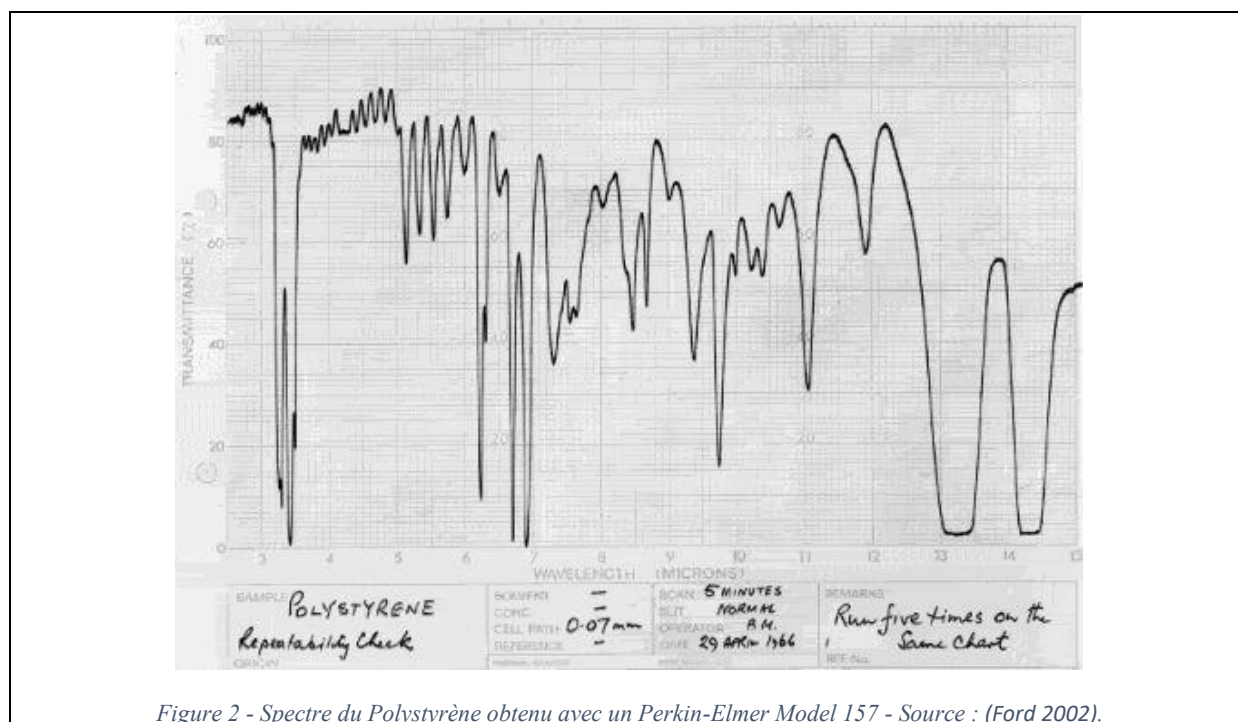


Figure 2 - Spectre du Polystyrène obtenu avec un Perkin-Elmer Model 157 - Source : (Ford 2002).

⁶⁸ Le proche infra-rouge est le domaine de longueurs d'onde électromagnétique entre 0,8 et 2 μm , correspondant aux modes de vibrations des molécules. L'infra-rouge lointain est le domaine de longueur d'ondes 25 à 1000 μm , indicateurs des propriétés des métaux, semi-conducteurs et des solides en général.

Malgré les limites de ces instruments un marché s'est constitué dans les années 1950 avec une douzaine de fabricants et des modèles de référence, plutôt orientés vers les besoins de la recherche scientifique : Beckman IR-3, Grubb-Parsons GS2, Hilger H800, Leitz Infrared Spectrograph, Perkin-Elmer Model 21⁶⁹. Beckman Instruments et Perkin-Elmer sont les leaders, avec leur lignée d'instruments, et Perkin-Elmer lance son Model 137 « Infracord » en 1957, premier modèle à bas coût largement diffusé (Figure 3).



Figure 3 - Publicité pour le Perkin-Elmer Model 137 – Source : (Ibid.).

Face à cet édifice technique et des instruments déjà industrialisés, dans les années 1950, l'éclosion de la FTS réactualise en quelque sorte des éléments anciens de l'histoire de la spectroscopie, en particulier des notions et des systèmes élaborés par Albert A. Michelson (1852-1931) à la fin du 19^{ème} siècle. Il a montré tout l'intérêt de l'interféromètre qui porte son nom pour la spectroscopie, dans le domaine visible pour l'essentiel. Expérimentateur hors pair, Michelson recourait à la méthode interférométrique pour révéler les détails de spectres de lumières variées. Il agissait alors en métrologue⁷⁰.

Avec ses instruments, Michelson utilisait son œil comme détecteur, or l'œil ne repère que les contrastes entre intensités lumineuses et ne peut pas mesurer de manière absolue l'intensité des lignes obtenues par l'instrument. En notant les contrastes, Michelson mesurait ainsi des « visibilités ». L'idée de remplacer les prismes et autres systèmes dispersifs par de l'interférométrie a été reprise ensuite par Heinrich Rubens (1865-1922) et son étudiant Herbert Holnagel (1882-1956) vers 1910, introduisant le thermocouple comme détecteur de l'intensité. Ils sont les premiers à obtenir des interférogrammes : des mesures de l'intensité lumineuse

⁶⁹ Un exemplaire de ce « Spectrophotomètre infrarouge » est conservé au Musée des arts et métiers (n° d'inventaire - 22459).

⁷⁰ Le prix Nobel est d'ailleurs attribué à Michelson en 1907 pour cette double contribution : « for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid ». A la demande du BIPM il fait une étude de l'étalon de mesure du mètre pour le rapporter à une longueur d'onde de la lumière du Cadmium (avec à terme une modification de la définition du mètre).

enregistrée en fonction de la position du miroir mobile de l'interféromètre. Michelson, avec ses visibilités, ne pouvait, au mieux, qu'enregistrer l'enveloppe (au sens mathématique) de l'interférogramme. Rubens et Hollnagel restent les premiers à instrumenter l'artefact « interféromètre » jusqu'au terme de la réalisation d'un interférogramme. Malgré cela le lien entre interférogramme et le spectre recherché n'a pas été clarifié avant les travaux d'Hollnagel en 1920. Mais Hollnagel quitte le domaine après sa thèse, et Rubens s'est orienté vers la conception d'autres types d'instruments.

La plupart des ingrédients étaient dispersés dans les esprits de quelques physiciens, et tout restait à faire en matière de FTS. Cependant le développement de la FTS est résolument ancré dans les transformations de la physique liées à la mécanique quantique, aux perfectionnements instrumentaux associés à un développement mathématique spécifique et à des usages en développement en physique atomique et en astronomie, bien postérieurs aux années 1920. La spectroscopie infra-rouge, poursuivant sa trajectoire, a été développée à base de prismes et réseaux, constituant ainsi les acquis rebattus par les futurs spectroscopistes à transformée de Fourier après 1950.

B. 1949-1950 : repenser les spectromètres infra-rouge

Au tournant de l'année 1950, deux physiciens vont soumettre le principe des spectroscopes à une analyse au goût du jour des théories de l'optique. Le français Pierre Jacquinot (1910-2002) et le britannique Peter Fellgett (1922-2008), indépendamment l'un de l'autre, vont contribuer à développer la spectroscopie interférentielle dans le domaine infra-rouge, en mettant deux avantages en avant : le multiplexage et le gain en luminosité lié à l'interférométrie, par rapport aux systèmes dispersifs. Leurs analyses amèneront à recentrer la conception instrumentale autour de l'interféromètre de Michelson dans cette spectroscopie.

Leurs analyses constituent un travail de fond, qui révèle leur intérêt de physiciens pour le développement non pas d'une théorie physique générale, mais d'une théorisation de l'instrumentation : l'artefact, comme les principes de cette instrumentation, sont un sujet légitime d'investigation. En outre, la mécanique quantique émergente dans les années 1930 est désormais la nouvelle toile de fond de l'optique, ce qui incite à revoir les instruments depuis les fondements de leur conception jusqu'à leurs limites expérimentales.

1. Pierre Jacquinot et la luminosité des instruments

Dès la fin des années 1940, Pierre Jacquinot aborde la question par la « luminosité » des instruments dans un comparatif des performances spectroscopiques des systèmes à prisme, à réseaux et interférométriques (de Fabry-Pérot)⁷¹. Il aboutit au fait que les interféromètres sont bien supérieurs, d'un point de vue analytique : ils captent plus de lumière, pour une résolution équivalente. Mais les étalons Fabry-Perot, artefacts d'usage courant dans la culture technique du laboratoire de Jacquinot à Bellevue, ne sont pas adéquats pour la spectroscopie car la différence de marche n'est pas modifiable. Alors que l'interféromètre de Michelson l'est par construction, avec un miroir mobile sur une branche, qui permet de combiner l'avantage de l'étendue, la luminosité, et la réalisation d'interférogrammes qui sont des encodages du spectre.

⁷¹ Jacquinot fait remonter ses débuts à la période 1942-47, sur les étalons Fabry-Pérot (Pierre Jacquinot 1984). Les premières publications datent de 1948 : sur les spectrographes et interféromètres étudiés avec Ch. Dufour son étudiant (P. Jacquinot et Dufour 1948) ; puis la présentation au 10^{ème} congrès du GAMS la même année (Pierre Jacquinot 1948). Les résultats sont plus largement diffusés en 1954 : (Pierre Jacquinot 1954b; Pierre Jacquinot 1954a).

Ces travaux fondateurs de la future FTS sont donc élaborés par une analyse très fine des artefacts fondamentaux utilisés en spectroscopie, laquelle aboutira à retenir fermement l'interféromètre pour remplacer les artefacts optiques dispersifs. L'avantage « multiplexe », c'est-à-dire la combinaison de plusieurs longueurs d'onde dans un seul train de mesure n'était pas dans l'horizon des recherches de Jacquinot, mais il s'ajoute aux atouts de la FTS. Fellgett aboutira à cette conclusion par un autre cheminement pratique et théorique.

2. Peter Fellgett : améliorer le rapport signal sur bruit

Peter Fellgett entre dans le sujet en ayant une expérience pratique différente : durant la seconde guerre mondiale, il a utilisé des spectromètres pour analyser différentes substances chimiques, en particulier pour caractériser les carburants et gommes de synthèse, produits durant la guerre. Frustré de la faible performance des spectromètres disponibles et des maigres capacités de leurs détecteurs, il développe ses travaux de thèse en physique sur le sujet, à l'Université de Cambridge (GB). Il aboutit à l'idée d'élaborer un système de « multichannel » : les systèmes dispersifs (prismes et réseaux) avec une fente pour sélectionner une longueur d'onde ont une déperdition très importante, il serait avantageux de traiter plusieurs longueurs d'ondes simultanément. Un peu comme dans un système téléphonique, dans lequel on fait passer plusieurs transmissions simultanément sur un même câble. Les interféromètres possèdent cet avantage de multiplexe, mais ces artefacts n'étaient pas dans l'horizon de recherche initial de Fellgett. Le multiplexage apporte un gain considérable dans le ratio signal sur bruit, ce qui était l'objectif premier de Fellgett. L'utilisation de l'interféromètre n'est pas une nécessité, mais d'abord une contingence, une circonstance, qui s'imposera comme le moyen le plus pratique pour tous ceux qui s'intéressent à cette spectroscopie en renouvellement.

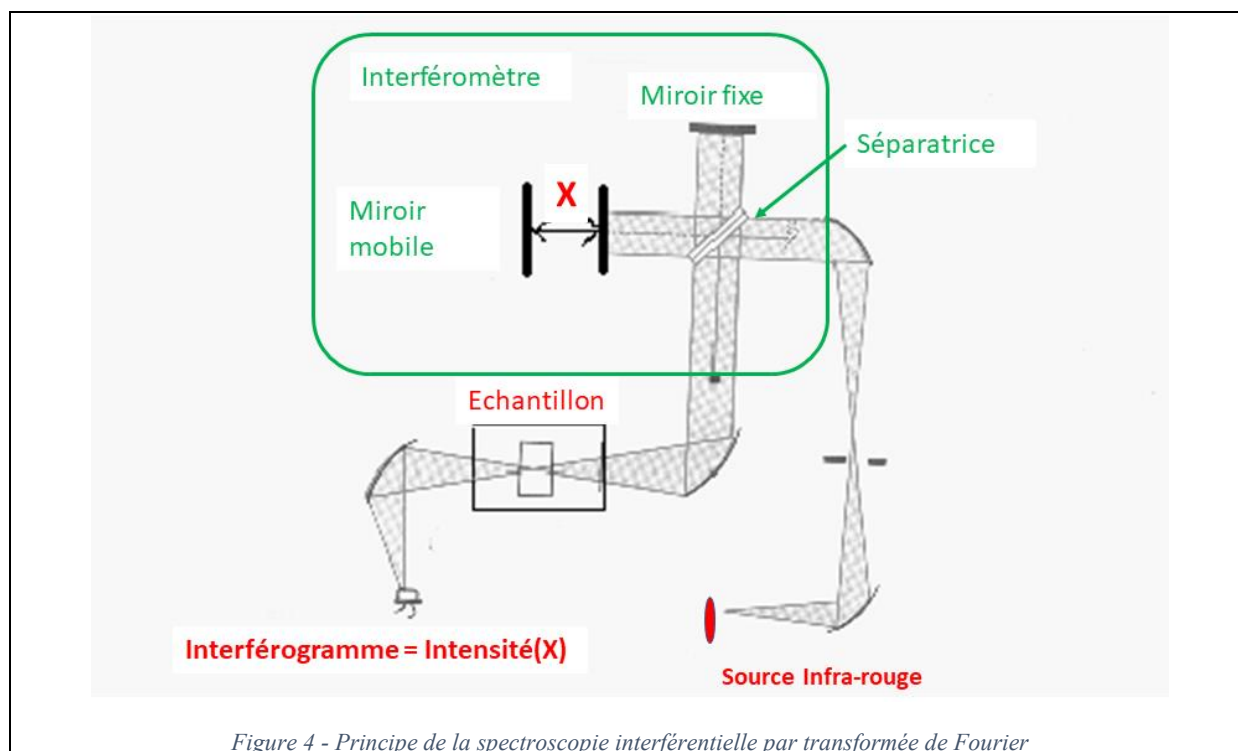
Fellgett présente en 1952 à la conférence « Molecular spectroscopy » à l'Université de l'Ohio State les principales lignes de cette « Multichannel spectrometry ». Le rapport publié fait quelques lignes seulement, assez peu éclairant pour quelqu'un qui n'a pas suivi la conférence elle-même⁷².

Fellgett comme Jacquinot, s'ils suivent des voies de recherche différentes jusqu'alors, ont une culture commune de la physique postérieure au fondement de la mécanique quantique : en faible lumière, aux limites quantiques, il est à la fois théoriquement difficile et techniquement crucial de développer la résolution des instruments optiques. En ce sens, ils sont d'une autre époque que celle de Michelson, le promoteur de la spectrométrie interférentielle dès la fin du 19^{ème} siècle. Mais au milieu du 20^{ème} siècle, ce seront de nouvelles problématiques scientifiques qui animent la génération de spectroscopistes, en premier lieu la spectroscopie atomique et la spectroscopie pour l'astronomie. Sans mettre leurs pas dans ceux de Michelson à proprement parler, ils vont contribuer à renouveler l'intérêt pour ce type d'instruments.

À la fin des années 1950, le principe de la spectroscopie interférentielle par transformée de Fourier se stabilise sur les premiers acquis et résultats (voir Figure 4 pour un schéma de principe simplifié de spectrométrie pour l'analyse d'un échantillon). L'échantillon est exposé à un faisceau lumineux qui a été préparé avec l'interféromètre de Michelson. L'opérateur fait varier la position du miroir mobile et relève sur le détecteur l'intensité reçue (dans l'exemple il s'agit de la lumière qui traverse l'échantillon) en fonction de la position du miroir. La courbe

⁷² Fellgett ne mentionne pas l'analyse de Fourier dans son principe (Fellgett 1952). Ce qui n'aidra pas à faire le lien avec les perspectives de Jacquinot au LAC à Bellevue (Pierre Connes 1992).

ainsi relevée est un interférogramme, qu'il faut inverser par transformée de Fourier pour obtenir le spectre de transmission de l'échantillon, qui caractérise les composants de celui-ci.



À l'aide des catégories que nous avons définies, nous pouvons reformuler la genèse instrumentale de cette manière. L'artefact interféromètre, qui est central, est inséré entre la source infra-rouge et l'échantillon à analyser. Un détecteur recueille les rayonnements traversant l'échantillon. Les physiciens élaborent une configuration instrumentale en assemblant ces différents artefacts et en définissant un mode d'usage : il s'agit de relever l'intensité sur le détecteur en fonction de la position du miroir mobile. L'instrument ainsi configuré délivre un interférogramme qui est relié au spectre de transmission infra-rouge de l'échantillon. D'une certaine manière l'instrument calcule analogiquement la transformée de Fourier de ce spectre, c'est un instrument de Fourier en ce sens qu'il réalise une opération de Fourier. Mais le défi instrumental est double : d'une part, instrumenter correctement les artefacts en question, et, d'autre part, concevoir un second instrument, capable de calculer l'inverse de la transformée de Fourier de l'interférogramme, pour aboutir au résultat recherché, c'est-à-dire le spectre lui-même.

Les propriétés mathématiques de la transformée de Fourier, et son inversion, jouent à plein dans cet instrument. En théorie, la transformée de Fourier permet de passer de la représentation temporelle du signal à sa représentation fréquentielle, et inversement⁷³ :

⁷³ Pour une fonction f représentant un signal ou une courbe, la transformée de Fourier s'écrit :

$$Tf(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-2\pi i.w.t} dt$$

$Tf(w)$ est la représentation fréquentielle du signal $f(t)$. Son inversion se calcule par la formule inverse :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Tf(w)e^{2\pi i.t.w} dw$$

l'interférogramme obtenu en déplaçant le miroir mobile (donnée temporelle) est transformé en spectre (donnée fréquentielle). Pour la seconde partie de l'ensemble instrumental, aucun artefact n'est *a priori* privilégié. L'histoire qui suit est en grande partie celle du choix de tels artefacts et de leur mise en œuvre instrumentale, pour calculer analogiquement ou numériquement l'opération de la transformée de Fourier de l'interférogramme : ce second instrument est un instrument mathématique de Fourier, qui complète le premier, pour constituer un spectromètre FTIR.

3. La promotion d'une « science des instruments » ?

Jacquinet et Fellgett sont clairement animés par l'idée de considérer le développement des instruments comme un sujet de recherche aussi valable et légitime qu'une question de physique théorique ou expérimentale. Leurs efforts participent d'une transformation du rapport à l'instrument, qui a des dynamiques différentes d'un domaine à l'autre, mais se construit sur des interstices disciplinaires et à cheval sur des problèmes d'ingénieurs, très concrets. L'optimisation de l'instrumentation devient une question centrale. Cela signifie à la fois améliorer le rapport signal/bruit et développer la capacité de multiplexage des instruments, aller chercher les limites des instruments aux faibles lumières et donc aux limites quantiques. Ainsi mécanique quantique et théorie mathématique de la communication (dite aussi « Théorie de l'information » de Shannon⁷⁴ datant de 1948) sont les deux grandes théories qui alimentent cette réinvention des spectroscopes. Ce sont des théories qui ne sont pas seulement conceptualisantes, mais des moyens de repenser les instruments, ce qui est en soit une nouveauté.

Ce point de vue sur l'instrumentation, le développement d'une « instrument science » est particulièrement important aux yeux de Fellgett⁷⁵, qui se fait l'avocat plus exactement d'une « instrument physics ». Pour lui la bascule vers la FTIR est le résultat d'une focalisation des recherches sur l'instrument. Le tout se développe au sein d'une communauté animée par la volonté de fabriquer un instrument pour faire les preuves de la supériorité du principe, et en même temps développer un instrument très générique et utilisable dans de multiples situations expérimentales, en physique, en optique, mais aussi en chimie analytique ou dans le monde industriel. C'est d'ailleurs ce que Johnston décrit en reprenant la notion de « recherche-technologie » au sujet de cette communauté. Considérer le développement de la FTIR comme le produit d'un changement de regard sur l'instrumentation fait également très directement écho à Davis Baird lorsqu'il évoque la « révolution de l'instrumentation » traversant le vingtième siècle caractérisée, selon lui, par le fait de percevoir les instruments comme porteurs de savoirs scientifiques et sujet légitime de recherches scientifiques.

4. L'obstacle des calculs et des mathématiques de Fourier

Le développement concret des nouveaux instruments sera long et fastidieux car ils sont composés d'un ensemble inédit d'artefacts matériels et immatériels : insistons sur les instruments mathématiques de calcul de transformée de Fourier, dans un contexte où les

⁷⁴ Il s'agit du très célèbre texte « A mathematical theory of communication » publié par Claude Shannon, des Bell Labs, en 1948 (Shannon 1948).

⁷⁵ « The basic idea of “instrument physics” is to understand in a full scientific sense why an instrument has a particular performance, and when this is done it is found that the phenomena which arise in a scientific instrument are just as fascinating, just as challenging and just as worthy of intellectual study, as the phenomena the instrument was intended to elucidate. » (Fellgett 1984) p. 95. Voir également (Johnston 2001).

mathématiques de Fourier sont un sujet considéré comme plutôt secondaire par la plupart des mathématiciens⁷⁶ et comme un bel objet théorique pour les physiciens⁷⁷. Cette question du calcul est importante, mais n'est pas encore cruciale dans les premiers moments de ce développement instrumental aux principes encore embryonnaires : l'analyse mathématique de l'instrument et la théorie de l'instrument font jeu égal avec les questions de calcul. Après quelques tâtonnements, la possibilité d'un calcul rapide de la transformée de Fourier s'imposera comme impératif à tous ceux qui développent la FTS.

L'introduction de calculs et de mathématiques de ce niveau dans une pratique expérimentale n'a de cesse d'être discutée par les spectroscopistes. D'une part, parce que même les promoteurs de la FTS expriment un certain scepticisme à l'égard de la montagne de calculs nécessaires⁷⁸. D'autre part, parce que les tenants d'une spectroscopie dispersive⁷⁹ sont catégoriques sur le fait qu'il est impossible de trouver le spectre à partir de la mesure d'un interférogramme.

L'importance du rapport aux calculateurs est donc assez évidente mais il faut bien distinguer les mathématiques de Fourier qui constituent en quelque sorte les mathématiques « de » l'instrument, le moteur théorique et le socle de la compréhension du processus instrumental, et le calcul numérique du spectre, résultat de l'inversion de l'interférogramme par une transformée de Fourier. Le premier point est ce qui justifie le nom donné à l'instrument : spectroscope par transformée de Fourier. Le second point n'est somme toute qu'un aspect de l'instrumentation, aux côtés de l'optique interférométrique de grande précision, des systèmes mécaniques et électroniques dédiés.

Dans le contexte français, postérieur à la seconde guerre mondiale, s'ajoute la problématique du sous-équipement en calculateurs électroniques. À une échelle plus large, il faut souligner que la composante électronique et informatique dans l'instrumentation de Fourier dans les années 1950 est encore réduite du simple fait que l'électronique des transistors sort à peine des Bell Labs, que l'électronique existante, celle des tubes à vide, est très lourde de contraintes et que les ordinateurs sont des machines gigantesques. En outre ces moyens sont relativement difficiles d'accès pour des physiciens (hormis ceux qui travaillent sur des questions nucléaires) et plus encore des spectroscopistes, dont la culture technique n'est aucunement un adjuvant à l'utilisation des calculateurs électroniques émergents.

5. Les premières réalisations au sein d'une communauté de « recherche-technologie » en construction

À l'échelle internationale le développement de la FTIR occupe plusieurs groupes, mais rassemble une toute petite communauté d'une douzaine de chercheurs, en constitution

⁷⁶ Dans la partie IV nous donnerons plus d'éléments de contexte sur ce point : le sujet de l'analyse de Fourier ne concerne qu'une petite partie, certes très active, de la communauté des mathématiciens, avant les années 1950.

⁷⁷ Si les séries de Fourier sont d'usage plus courant en physique et dans le milieu des ingénieurs, en revanche la notion de transformée de Fourier est pour beaucoup un expédient théorique, qui intervient dans différents chapitres de la physique, en optique par exemple, mais qui n'est pratiquement pas utilisée au-delà des considérations théoriques.

⁷⁸ Dans ses réminiscences sur les années pionnières de développement de la FTS, John Strong écrit : « Like many another, I failed at first to recognize the great promise of Fellgett's results. In my case, I attribute this to bias engendered by involvement in the ruling of diffraction gratings; and, to an experimentalist's natural distrust of anything involving such a prodigious calculation. » (J. Strong 1984, p. 103).

⁷⁹ Dans (Johnston 1991, p. 117) Gebbie rapporte au sujet de S. Tolansky (expert des méthodes spectroscopiques) : « [he] categorically pronounced that it would be impossible to transform [interferograms] ».

progressive. Elle se rassemble autour de quelques colloques déterminants et des publications : les comptes-rendus des dits colloques et les articles publiés dans les revues telles que *Journal of the Optical Society of America* (de loin la plus fréquentée) ou le *Journal of Scientific Instruments*. Sa reconnaissance institutionnelle est compliquée par le caractère interstitiel de cette « recherche-technologie ». Les premières réussites cimentent la communauté et cristallisent les premières orientations de l'instrumentation en cours de développement.

Le tout premier résultat significatif, l'obtention d'un spectre par interférométrie (mais pas encore un Michelson) et par calcul de transformée de Fourier, est vraisemblablement dû à P. Fellgett, durant ses travaux de thèse, plutôt effectués en solitaire. Pour faire ses calculs, Fellgett a utilisé les bandes de Lipson-Beevers, sorte de tables numériques pour faciliter les calculs de coefficients de Fourier, utilisées couramment en cristallographie par rayons X. Fellgett se trouve alors à Cambridge (GB) épiscentre du développement de cette instrumentation à rayons X, dont les promoteurs sont W.H. Bragg et W.L. Bragg, père et fils, comme nous le détaillerons dans la partie suivante (partie III). Cambridge est aussi bientôt le théâtre de la construction des calculateurs électroniques digitaux EDSAC et EDSAC II, au sein du Mathematical Laboratory, avec Maurice Wilkes (1913-2010). Fellgett sera un des premiers à programmer l'EDSAC II pour le calcul des transformées de Fourier, aux côtés des cristallographes. Deux artefacts, les bandes de Lipson-Beevers et l'EDSAC, sont au cœur d'échanges et de circulations entre acteurs des instruments de Fourier : cette concordance d'acteurs, d'un lieu et de ses artefacts donnera matière à une discussion dans la suite.

La première réalisation d'un interféromètre à transformée de Fourier dans l'infrarouge lointain est le résultat des recherches de John D. Strong à l'Université Johns Hopkins de Baltimore (Maryland). L'équipe qui l'a réalisé est constituée d'Alastair Gebbie (1922-2005) un « visiting scholar » venu de Grande-Bretagne, et de deux étudiants de Strong, George Vanasse (1924-2016) et Ernest V. Loewenstein, qui iront bientôt à Cambridge (Massachusetts) pour développer une instrumentation interférométrique dans l'infrarouge moyen, à l'Air Force Cambridge Research Laboratory⁸⁰.

Cette première réalisation est très significative de l'impact des calculateurs électroniques d'une part, et des théories mathématiques de l'analyse harmonique, d'autre part, reposant sur des résultats mathématiques produits dans les années 1930. Au MIT en effet, le département d'ingénierie électrique est celui où ont été conçus les analyseurs différentiels de Vannevar Bush⁸¹ dans les années 1930 : les analyseurs ont été des modèles de calculateurs analogiques reproduits, développés et analysés sous toutes les coutures dans les premières heures des technologies électroniques pour le calcul. Après-guerre, le projet Whirlwind qui prend forme au MIT compte parmi les premiers ordinateurs gigantesques en fonction : l'enthousiasme pour ces calculateurs, dont l'impact sur les recherches en physique n'est pas encore connu, gagne J. Strong et A. Gebbie⁸².

⁸⁰ Voir (Griffiths 2017).

⁸¹ L'analyseur différentiel n'est pas un instrument de Fourier, mais un calculateur analogique capital au regard de la génération de calculateurs qu'il a inspiré (et des analyses mathématiques concomitantes). (V. Bush 1931; V. Bush et Caldwell 1945; V. Bush 1936) pour les réflexions originales ; et (Owens 1986; Puchta 1996; Care 2010) pour des éléments historiographiques.

⁸² (Gebbie 1984, p. 106).

Gebbie a souligné en outre l'influence du concept mathématique de fonction d'autocorrélation dans l'analyse instrumentale, qui lui vient des travaux du physicien spécialiste des ondes radio, John Ashworth Ratcliffe⁸³ (Cambridge - GB). L'interféromètre de Michelson est un instrument qui peut produire l'autocorrélation des signaux optiques : l'artefact ainsi instrumenté permet d'encoder les signaux, et leur décodage peut se faire théoriquement grâce au théorème de Wiener-Khintchine. C'est une autre clé mathématique de cette histoire, un résultat mathématique majeur de l'analyse de Fourier dans les années 1930 obtenu par Norbert Wiener, mathématicien prolifique en poste au MIT, nous y reviendrons plus en détails dans la partie IV. Indiquons ici simplement que le théorème de Wiener-Khintchine, démontré par Wiener en 1930 et indépendamment par Alexandre Khintchine (1894-1959) en 1934, établit une relation par transformée de Fourier entre la fonction d'autocorrélation et la densité spectrale de puissance du signal. Voilà donc un autre lieu, d'autres acteurs, partageant une culture de l'électronique pour le calcul et des mathématiques de Fourier. Tous les éléments théoriques sont rassemblés pour lancer l'équipe sur une voie prometteuse mais sinueuse, sur un mode très exploratoire.

Dans les années 1950, Strong fait venir dans son groupe un mathématicien (collègue de Gebbie) de l'University College London : L.A. Wigglesworth. Il est déjà familier avec les questions d'analyse numérique, il a lu le texte de Lord Rayleigh sur les méthodes de calcul de transformée de Fourier⁸⁴. Cette collaboration indique que les fondements théoriques mathématiques sont absolument déterminants dans la construction d'une technique instrumentale fiable et acceptable par la communauté.

Les résultats de 1957 obtenus par spectroscopie sont des mesures de la transmission de l'atmosphère dans le domaine submillimétrique⁸⁵. En utilisant un ordinateur IBM650 (de l'IBM Service Bureau de Boston) chaque point des 250 éléments spectraux a coûté \$100 et plus d'une heure de calcul⁸⁶. Cet ensemble de résultats est présenté au colloque de 1957 à Bellevue, moment décisif de la constitution d'une communauté transnationale sur le sujet.

Gebbie développera au National Physical Laboratory (GB) à partir d'octobre 1957 un projet de spectromètre FTIR (dans l'infra-rouge lointain), bénéficiant cette fois de moyens de calcul très importants⁸⁷. Très peu d'autres lieux réunissent de telles conditions pour développer cette instrumentation.

⁸³ Gebbie suit un séminaire de Ratcliffe sur le sujet, en 1951, à l'Université de Reading (Gebbie 1984). Ratcliffe a fait sa thèse (1924) avec le spécialiste de l'ionosphère Edward Appleton ; Ratcliffe a également supervisé les travaux de thèse de Maurice Wilkes (en 1937), pionnier de l'informatique à Cambridge (GB), concepteur de l'EDSAC, et nous montrerons l'importance de ces travaux concernant une autre instrumentation de Fourier, en cristallographie (voir Partie III).

⁸⁴ Rayleigh en 1912, dans son texte « Remarks concerning Fourier's theorem as applied to physical problems » a dessiné quelques grandes lignes pour l'utilisation des théories de Fourier, utiles à la spectroscopie, mais que ni Michelson, ni des éventuels successeurs n'ont repris. (Rayleigh 1912).

⁸⁵ (Gebbie 1957). Les interférogrammes ne sont pas obtenus par un interféromètre de Michelson, mais un interféromètre à réseau ; les observations ont été réalisées à la station Jungfrau en Suisse.

⁸⁶ (Gebbie 1984).

⁸⁷ Les machines ACE et DEUCE en développement au NPL, 20 fois plus rapides que l'IBM650. Il bénéficie en outre de la bienveillance complète du Superintendent de la Mathematics Division E. T. Goodwin et de la mise à disposition d'un jeune mathématicien R. Illsley qui prépare les codes pour la programmation des ordinateurs.

C. Au Laboratoire Aimé Cotton – 1949-1965

Revenons maintenant à Bellevue, au Laboratoire Aimé Cotton (LAC), lieu crucial des premières heures de la FTS. Sous l'impulsion de Jacquinot, la recherche en FTS démarre véritablement en 1954 et prend forme au Laboratoire Aimé Cotton qui jouit d'une solide expérience en spectroscopie, en particulier en spectroscopie atomique. Les étalons Fabry-Pérot, les techniques spectroscopiques à réseaux sont des technologies courantes au LAC, performantes et sans cesse améliorées. Le défi de la FTS est d'autant plus relevé qu'il faut rivaliser avec les spectroscopes les plus en pointe déjà mobilisés dans le laboratoire. Pour corser encore le défi, ils choisiront de développer la FTIR en infra-rouge proche (plus complexe que dans le domaine de l'infra-rouge lointain) en haute résolution puis ultra-haute résolution. Choix porteur de beaucoup d'innovations reprises dans les spectromètres commerciaux par la suite.

Les artisans principaux de la FTS sont Pierre et Janine Connes, qui arrivent au LAC en 1954 et feront du papier de Jacquinot sur la comparaison de la luminosité leur premier article de chevet, ainsi que le texte un peu plus confidentiel de 1954, de sa conférence au GAMS intitulé « Quelques perspectives d'avenir en spectroscopie instrumentale »⁸⁸. La réalisation de la FTS constitue le cœur du travail de thèse de J. Connes, achevée en 1960 (publiée en 1961). Mais le défi est immense, l'objectif étant de concevoir à terme un instrument de très haute résolution, dans le domaine du proche infra-rouge et se distinguant clairement des travaux de l'équipe de Strong.

1. La thèse de Janine Connes et les mathématiques de la FTS

Avec les innombrables réalisations expérimentales de Pierre Connes, les travaux de thèse de Janine Connes constituent une pierre essentielle de l'édifice en consolidation. Ses travaux dressent les grands principes, la théorie complète de l'instrument, circonscrivent les mathématiques de Fourier utiles pour la FTS. Ils rentrent dans beaucoup de détails quant aux techniques expérimentales en jeu : imperfections des artefacts optiques, des alignements, les irrégularités du déplacement du miroir, les erreurs de corrections des phases dans l'interférogramme, les conditions d'un rapport signal sur bruit optimal, etc. La thèse est publiée en 1961, en plusieurs morceaux dans la *Revue d'optique théorique et expérimentale*, et elle est rapidement traduite aux États-Unis, signe de l'importance immédiatement accordée à ces résultats⁸⁹.

⁸⁸ Conférence au Groupement pour l'Avancement des Méthodes Spectroscopiques (GAMS). Les premiers temps sont relatés par P. Connes dans (Pierre Connes 1992).

⁸⁹ « Mme. Connes has written a fundamental paper on Fourier transform methods applied to the Michelson spectrometer. This paper [...] was informally translated from the French for use within our laboratory. However, the content is of such high interest that we believe a wider circulation would be valuable to English-speaking scientists working in the infrared. [...] The translation was supported by HITAB, part of Project DEFENDER, under Bureau of Naval Weapons WEPTASX RTSA 3001o3/216- 7/F019-01- 002. » – publié et diffusé en 1963.

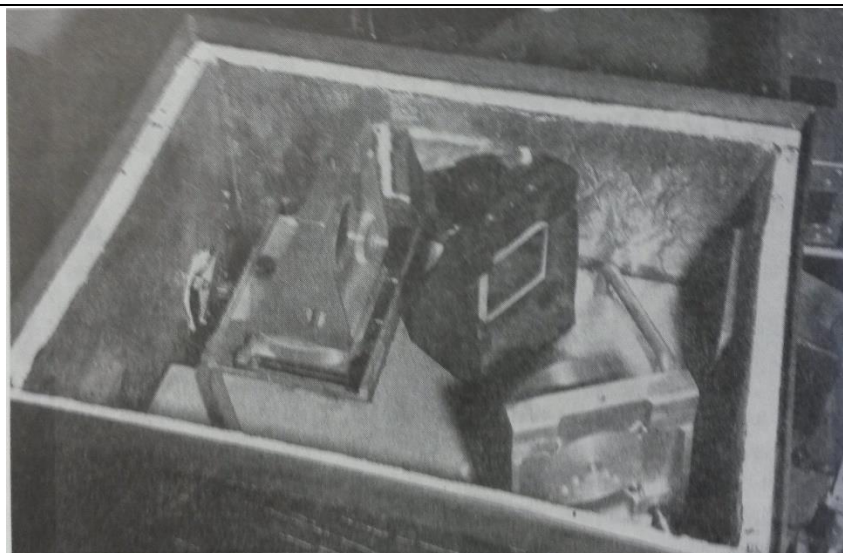
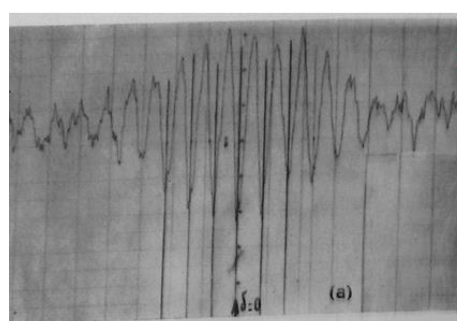
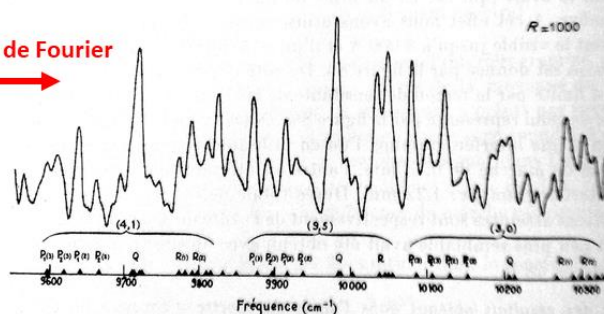


Figure 5 - Prototype d'interféromètre utilisé pour la thèse de Janine Connes - Source : (Janine Connes 1961, p. 232).



Interférogramme mesuré

Transformée de Fourier



Spectre calculé

Figure 6 - Premiers calculs de transformée de Fourier d'interférogramme – Source : (Ibid., p. 244).

La thèse nous renvoie à toute la complexité de la conception de l'instrument, dans sa partie optique évidemment (voir Figure 5), mais aussi dans la mécanique de précision, l'appareillage électronique inédit et la mise en œuvre de traitements mathématiques totalement étrangers aux spectroscopistes jusque-là (voir Figure 6 pour les premiers calculs de spectre réalisés à l'occasion de ses travaux de thèse). Pour préciser le contexte, il faut souligner que J. Connes a fait la démarche de se rapprocher des mathématiciens susceptibles de lui apporter des clés théoriques : « Je suis allée voir tous les mathématiciens qui travaillaient sur la transformée de Fourier : il leur fallait connaître la forme de la fonction »⁹⁰. Ce qui signifie que la voie du calcul numérique, reposant sur un tracé et des courbes de mesures expérimentales, n'était pas une option, peut-être même pas une question mathématique d'intérêt à leurs yeux.

L'apprentissage et l'appréhension des difficultés liées à la FTS passe par un chemin différent : par les théories de l'information, dont les traités emblématiques de Shannon, Wiener et les traductions des travaux russes sur le sujet. J. Connes se construit une culture technique en termes d'information, tentant d'en appliquer les résultats pour la théorisation de l'instrument.

⁹⁰ Interview de J. Connes (4 juin 2018 – réalisée par S. Christ).

a) *Le traitement mathématique du bruit*

La thèse montre dans quelles conditions le spectre peut être calculé en faisant la transformée de Fourier de l'interférogramme à partir de valeurs discrètes relevées sur cet interférogramme. Dans le cas idéal de l'absence de bruit dans le signal, il suffit de relever un nombre de points de l'interférogramme égal au nombre d'éléments spectraux à étudier. Avec Nozal⁹¹, et encore après sa thèse, l'analyse est poursuivie, détaillée, lorsque le bruit dans l'appareil altère l'interférogramme. Dans ce cas les compromis instrumentaux et l'articulation entre la technique instrumentale et les mathématiques en jeu sont particulièrement importants.

Tout d'abord, le bruit, en pratique, a un spectre large. Pour calculer directement le spectre de la source ou de l'échantillon à partir d'un interférogramme il est nécessaire d'augmenter le nombre de points relevés, donc le nombre d'opérations dans le calcul de la transformée de Fourier, ce qui est précisément un obstacle à cette époque-là. Reste alors à trouver un moyen de limiter le spectre du bruit dans le domaine du spectre à étudier. Ce qui peut se faire par des techniques instrumentales connues alors : filtre passe bande ou méthode du changement de fréquence. À ces complications de montage, Connes et Nozal répondent par un détour mathématique : le filtrage mathématique.

La méthode de filtrage mathématique utilise l'interférogramme $I(\delta)$ enregistré à travers un simple filtre passe bas. À partir de valeurs discrètes de $I(\delta)$ on calcule un second interférogramme $I''(\delta)$ en effectuant la convolution de $I(\delta)$ par la réponse percussionnelle d'un filtre dont la bande passante coïncide avec le domaine des fréquences de Fourier à étudier. Il suffit de faire ensuite la transformée de Fourier de $I''(\delta)$ avec le nombre de points minimum pour obtenir dans le spectre un rapport signal/bruit maximum. Comme le temps de calcul du produit de composition est faible par rapport à celui de la transformée de Fourier, le temps de calcul est voisin du temps de calcul minimum.⁹²

Cette analyse montre le type de compromis mathématico-expérimentaux nécessaires à la mise au point de l'instrument et l'expertise acquise par J. Connes. C'est par l'analyse mathématique de ce filtrage, incluant toutes les problématiques du calcul effectif des convolutions et transformée de Fourier (sur une IBM704 du Comité Européen de Calcul scientifique), que l'instrument est rendu opérationnel.

b) *L'apodisation*

Outre le principe général de la FTS, un point essentiel est mis en jeu dans la thèse, celui de l'apodisation, lié aux contraintes de l'enregistrement de l'interférogramme. En effet pour obtenir un interférogramme complet, il faudrait pouvoir déplacer le miroir de l'interféromètre à l'infini. La finitude de l'instrument impose une coupure nette dans l'enregistrement, ce qui se traduit par des oscillations parasites dans le spectre. Il faut corriger l'interférogramme avec un filtrage pour éliminer les parasites sans polluer le spectre avec des résultats fantômes produits par ce traitement. Apodiser, littéralement « couper les pieds », c'est en fait lisser les coupures liées au mode d'acquisition de l'interférogramme. Il faut trouver des moyens pour compenser au mieux la finitude matérielle, dans un compromis entre la réduction des distorsions instrumentales et la perte de résolution qu'un filtrage génèrera.

Il existe plusieurs manières de procéder à ce lissage, d'où l'importance de la discussion théorique sur ce filtrage et ses conséquences. C'est un point de désaccord entre les promoteurs

⁹¹ (J. Connes et Nozal 1961) - « Le filtrage mathématique dans la spectroscopie par transformation de Fourier ».

⁹² (*Ibid.*, p. 359).

de la FTS et ses détracteurs de l'époque : peut-on raisonnablement « scientifiquement » introduire un argument et un traitement mathématique dans le processus de mesure ? Pour les avocats de la FTS, la réponse est affirmative, c'est un filtre, non pas optique mais mathématique, qui n'introduit pas *a priori* plus d'erreurs qu'un autre filtre optique. Pour les détracteurs, c'est bien trop artificiel. La nature du filtre est au cœur de la problématique épistémologique, et le statut des mathématiques dans la question instrumentale est fortement discuté. L'élaboration du résultat sorti de l'instrument est désormais incontestablement pétrie de traitements mathématiques, dont la justification est le fruit d'une analyse mathématique spécifique, produite par J. Connes et ses collègues physiciens.

c) *Vers le calcul numérique des transformées de Fourier*

Le calcul final du spectre est le problème instrumental majeur dans la FTIR car la première partie de l'instrument enregistre avant tout un interférogramme, donc une mesure encodée du spectre. Sans moyen de décoder l'interférogramme, l'instrument est à peu près inutile. Si Janine Connes dans sa thèse et par la suite en vient au calcul numérique par ordinateurs, ce n'est pas l'unique voie possible. Les solutions de Jacquinot ne sont pas de cet ordre, mais plutôt analogiques. D'autres seront hybrides de plusieurs technologies. Mais un premier déclic pour l'équipe du LAC va se faire très tôt, en 1956 : Charles Dufour, de retour d'un séjour scientifique aux États-Unis évoque l'idée de résoudre la question par des calculs numériques sur calculateurs électroniques. Sous-entendu : il est possible de réduire la transformée de Fourier « analogique », telle que les physiciens la connaissent alors, à des calculs numériques, des additions et multiplications, en grand nombre. Cela suppose néanmoins une capacité de calcul numérique importante, non accessible aux chercheurs du LAC sur le moment.

La confirmation de cette perspective est le fruit du colloque de Bellevue 1957 au cours duquel sont présentés les spectres dans l'infra-rouge lointain de Gebbie et Vanasse, calculés sur l'ordinateur IBM 650. La résolution est faible mais c'est une confirmation et surtout une promesse. L'état d'esprit, le changement de perspective dans le rapport aux mathématiques et au calcul de la transformée de Fourier est bien rendu dans ces mots de P. Connes :

*The reason we did not get spectra is that we were sadly innocent of digital techniques, our greatest single failure in those early times. Fourier's integrals we took as elegant devices for describing a host of physical processes; it never entered our heads that in actual practice they could be boiled down to a set of lowly multiplications and additions.*⁹³

2. Les réalisations de FTS au Laboratoire Aimé Cotton

Au fil des réalisations et des défis technologiques rencontrés, l'équipe est renforcée, en particulier par Guy Michel, ingénieur électronicien qui monte de toute pièce l'équipe d'électronique du LAC. Pour remonter de l'interférogramme au spectre, Jacquinot a suggéré plusieurs pistes, qui ont un point commun : ce sont des concepts de la physique adaptés à la question du calcul de transformée de Fourier.

a) *Calculateur hybride*

En l'occurrence, c'est sur l'utilisation de l'analyseur d'onde que le développement s'engage⁹⁴. Sur l'inspiration de Jacquinot, G. Michel réalise un calculateur hybride dédié.

⁹³ (Pierre Connes 1992, p. 568).

⁹⁴ (*Ibid.*, p. 567).

L'intensité de l'interférogramme est enregistrée de manière analogique sur une bande magnétique, en modulation de fréquence sur une porteuse. Les franges de la lumière de la lampe au mercure utilisée comme source, sont enregistrées sur une piste séparée. Un système digital permet de démultiplier les fréquences lors de la lecture de la bande. La bande tourne en boucle et quelques éléments du spectre sont mesurés par cross-correlation de chaque tour.

Avec ce principe quelque peu alambiqué, les difficultés techniques sont légion, à commencer par l'enregistrement fiable sur bande magnétique. En 1966, la première version du démultiplieur est à base d'électronique à tubes, la seconde est transistorisée⁹⁵. Le résultat n'est pas une réussite absolue, c'est un pavé sur le chemin des systèmes de calcul du spectre, comptant parmi les solutions analogiques sur lesquelles nous reviendrons dans la suite. Le système est finalisé très tard et l'arrivée de l'algorithme de FFT va rapidement tous les balayer.

b) Un jalon dans l'histoire de la spectrométrie FTS : les spectres de planètes de Janine et Pierre Connes

Dans les années 1950 Fellgett avait obtenu quelques résultats, symboliques, montrant l'intérêt du multiplexage pour les mesures en astronomie. Outre la spectroscopie atomique, l'astronomie reste le domaine dans lequel la spectroscopie est porteuse et synonyme de découvertes : la spectroscopie est en effet un des rares moyens de mesure et de caractérisation des objets célestes par leur émission lumineuse. Or dans ce domaine la luminosité est très faible, les spectroscopes sont donc directement confrontés à leurs limites.

Les résultats obtenus par les époux Connes concernant les spectres des planètes Mars et Venus (dans le proche infra-rouge) sont certainement les plus emblématiques de cette période de construction de la FTIR⁹⁶. Leur spectroscopie est un véritable instrument de précision, avec un système d'enregistrement de l'interférogramme qui collecte 12 000 points et peut être arrêté et relancé en fonction des conditions d'observation. L'enregistrement se fait sur bande perforée, les données sont imprimées sur papier, pour mémoire et pour vérification, au besoin. Une partie des observations ayant été réalisées au Mount Wilson (Etats-Unis), les données ont été transmises par voie téléphonique au centre de calcul du Jet Propulsion Laboratory (au Caltech – Los Angeles) - techniquement, par un Dataphone qui convertit les bandes perforées en impulsions téléphoniques - où se trouve une machine IBM 7090 capable de réaliser le calcul numérique du spectre. Pour les observations réalisées en France, à l'Observatoire Saint Michel, la transmission prend des aspects plus rocambolesques : les bandes perforées sont convoyées par voiture à l'aéroport de Marseille, envoyées par avion à Paris, puis vers l'Observatoire de Meudon où se trouve la machine 7040 réalisant les calculs numériques.

Dans les deux cas les ordinateurs IBM calculent les spectres, dont les résultats sont téléphonés aux observateurs pour préparer la nuit suivante d'observations. Dans le meilleur des cas, il faut quelques heures pour opérer, mais c'est sans compter l'accumulation d'erreurs provenant de sources multiples dans le processus et qui ralentit considérablement les opérations, sachant que tout repose sur un contrôle manuel des informations.

⁹⁵ Il reste très peu d'éléments tangibles sur ces travaux, hormis la publication sur le démultiplieur car son utilisation est potentiellement plus générique : (P. Connes et Michel 1967).

⁹⁶ (Janine Connes et Connes 1966).

c) *Trois générations de FTS au Laboratoire*

L'aboutissement en 1965 des perfectionnements du spectroscopie de première génération, conçu par les époux Connes, est un système permettant la collecte de 64 000 points, une différence de marche de 5 cm sur l'interféromètre (amplitude du miroir mobile) et un temps de calcul réduit à quelques heures (environ 1h30 par spectre sur IBM 7040)⁹⁷.

La réalisation du second instrument est coordonnée par Jacques Pinard, sous la direction de Pierre Connes, au cours de ses travaux de thèse sur la période 1965-68⁹⁸. Le nouvel instrument est d'une autre dimension (80 cm de différence de marche) et perfectionné sur toutes ses composantes, incorporant aussi un laser He-Ne pour point de référence et calibrage.

La troisième génération est une sorte d'œuvre collective des élèves de P. et J. Connes (H. Delouis, G. Guelachvili, J.P. Maillard et toujours l'électronicien G. Michel⁹⁹) et un aboutissement avec des objectifs très symboliques : 1 m de différence de marche et 1 million de points enregistrés. Ce dernier modèle est construit en trois exemplaires, dont un est aujourd'hui conservé au Musée des arts et métiers¹⁰⁰.

Le calcul de la transformée de Fourier dans le cas du million de points requiert un traitement nouveau, car la mémoire des ordinateurs, même les plus puissants, est trop réduite encore en 1967-70 pour gérer autant de données. Hervé Delouis, sous la direction de Janine Connes et dans le cadre du Centre de calcul à Orsay (le CIRCE et son IBM360/75), a mis en œuvre et adapté les programmes de FFT pour ce problème spécifique¹⁰¹ : pour se caler dans la mémoire (256 Ko de mémoire centrale) de l'ordinateur, les opérations lourdes de transformées de Fourier discrètes sont découpées en plusieurs transformées élémentaires, de moindre taille, puis elles sont intercombinées. Le programme « FFT 1024K » calcule la transformée de Fourier en 22 minutes, et le programme « DFT » en 9 minutes¹⁰².

3. 1970 - « Computing problems in Fourier Spectroscopy »

L'équipe du LAC partait avec l'enthousiasme de Jacquinet, mais aussi un certain scepticisme eu égard à la complexité de la mise en œuvre technique et un gros déficit en matière d'analyse numérique et de calculateurs électroniques, dans les années 1950. En quelques années le laboratoire est devenu un centre de référence mondiale sur la FTS, avec des succès éclatants dans la réalisation des instruments à ultra haute précision dans le domaine du proche infra-rouge et l'analyse de spectres planétaires sans équivalents. À la conférence internationale sur la spectroscopie de Fourier à Aspen en 1970, la supériorité de la FTS dans le domaine infra-rouge est scellée et la reconnaissance du LAC est totale. À cette occasion J. Connes donne une

⁹⁷ En nous focalisant sur l'aspect calculatoire et mathématique de l'instrumentation, il ne faut pas faire oublier la grande technicité des multiples composants de l'instrument : détecteur en « œil de chat » qui évite les dérèglages dans la transition du miroir mobile, asservissement du chariot de translation, modulations internes pour s'affranchir des fluctuations, etc. L'ensemble est une performance technologique, qui a bénéficié de la collaboration du Jet Propulsion Lab.

⁹⁸ « Réalisation d'un spectromètre par transformation de Fourier à très haut pouvoir de résolution » (Pinard 1968).

⁹⁹ « Spectroscopie de Fourier avec Transformation d'un Million de Points » (J. Connes et al. 1970).

¹⁰⁰ N° d'inventaire 44670.

¹⁰¹ Les programmes constituent une partie du travail de thèse d'H. Delouis « Nouvelles méthodes de calcul relatives à la spectroscopie par Transformée de Fourier », (Delouis 1968), et ils seront présentés en 1970 au Colloque d'Aspen, (Delouis 1970).

¹⁰² À condition que la fonction à inverser soit paire ou impaire, et donc d'exploiter le moindre raccourci mathématique dans les calculs.

présentation générale spécifiquement orientée sur « Computing problems in Fourier Spectroscopy »¹⁰³.

Son propos apporte un réel éclairage quant aux multiples fonctions mathématiques et calculatoires devenues indispensables dans la pratique de la FTS. Cinq opérations, cinq fonctions mathématiques ressortent :

1. Le nettoyage de l'enregistrement de l'interférogramme pour corriger les erreurs de l'instrument et le rendre aussi proche que possible d'un enregistrement « idéal ».
2. La possibilité de calcul rapide de morceaux réduits du spectre, à partir de l'interférogramme, pour les premiers tests et évaluations.
3. Le calcul du spectre dans son intégralité par transformée de Fourier.
4. Les opérations réalisables sur le spectre calculé, comme l'apodisation et le moyennage de plusieurs spectres.
5. L'extraction des données du spectre : détection automatique des lignes dans le spectre, mesure des intensités, positions des lignes, des profils, etc.

Pré-traitement de données, inversion de la transformée de Fourier, filtrages, telles sont les multiples fonctions épistémiques dévolues aux mathématiques dans la FTS, qui dépasse la seule programmation d'un algorithme de transformée de Fourier. Nous avons vu précédemment les enjeux et débats épistémologiques liés à l'apodisation et au filtrage des données, nous allons maintenant insister sur deux points qui montrent la complexité et l'intrication mathématico-expérimentale dans cette histoire : les méthodes de correction de phases et le développement de programmes de FFT.

a) Méthodes de correction des phases

Dans son principe, la FTS avec un interféromètre à miroir mobile génère un interférogramme symétrique autour du point de différence de marche nulle entre les miroirs. Mathématiquement, c'est une fonction paire, dont la transformée de Fourier n'aura, sur le principe, que des termes en cosinus et une partie imaginaire complexe nulle. La réalité instrumentale est différente car toute asymétrie dans l'interféromètre et dans la mesure réalisée, aura des répercussions en une asymétrie de l'interférogramme. Or les deux miroirs de l'interféromètre ne sont jamais rigoureusement identiques. La partie imaginaire de la transformée de Fourier d'un interférogramme est en quelque sorte le reflet des défauts matériels du dispositif et ajoute une information non pertinente sur la lumière à analyser. Comme pour l'apodisation plusieurs méthodes et traitements mathématiques ont été imaginés pour compenser les défauts matériels. Les méthodes par le calcul des intensités, la méthode de Mertz, la méthode de Forman sont développées dans les années 1960¹⁰⁴. Sans rentrer dans trop de détails techniques, on peut évoquer les compromis mathématiques dans celle de Mertz¹⁰⁵. La méthode consiste à mesurer un court morceau de l'interférogramme d'un côté du point de référence (différence de marche nulle) et mesurer dans toute la longueur possible l'interférogramme de l'autre côté. Par calcul la partie courte sert à déterminer les phases du spectre, c'est-à-dire la partie imaginaire, donc les défauts. La partie longue permet d'évaluer les amplitudes, c'est-à-dire la partie réelle. Les phases calculées sont ensuite utilisées pour corriger les amplitudes. Cette méthode mathématico-instrumentale fixe un protocole

¹⁰³ (J. Connes 1970).

¹⁰⁴ Voir (Johnston 1991, p. 136) pour plus de détails sur ces méthodes.

¹⁰⁵ (Lawrence Mertz 1967).

expérimental particulier et repose sur une analyse mathématique, en plus de la capacité à calculer des transformées de Fourier rapidement.

b) Janine Connes et la mise en œuvre de la FFT

On peut en quelques mots donner encore plus de sens à la place des mathématiques à la fois dans la carrière de J. Connes et dans les modes de conception des instruments de FTS. Nous avons déjà indiqué que l'algorithme de FFT publié en 1965 par James Cooley et John Tukey marque un tournant, mais il faut aussi souligner le rôle de J. Connes dans la mise en œuvre de cet algorithme. Si la première phase du développement de la FFT est en partie interne à IBM pour garder une avance sur le sujet, Cooley¹⁰⁶ organise un atelier sur la FFT en 1966, invitant J. Connes dans son organisation¹⁰⁷. C'est la première « Arden House Conference » réunissant les meilleurs spécialistes du calcul des transformées de Fourier, dans divers domaines, pour échanger sur les modes de programmation et l'utilisation de la FFT. Étant donnée la nature de l'enjeu en FTIR (calcul de spectre de plus de 512 000 points) et sa difficulté technique, c'est le problème soumis par J. Connes qui est choisi comme problème pilote pour concevoir un programme opérationnel et étendre le champ d'application. Tout l'intérêt de l'algorithme réside dans son potentiel pour traiter des calculs avec beaucoup de points : pour un échantillon de N points, il faut environ N^2 opérations pour une transformation de Fourier discrète « normale », et $N \log N$ avec la FFT. Les gains de temps sont considérables et d'autant plus importants que les interférogrammes sont grands. Avec plus de 500 000 points, le calcul ordinaire requiert donc plusieurs milliards opérations ; avec la FFT ce seront « seulement » 3 millions.

L'implémentation d'une FFT pour la FTIR est un travail réalisé conjointement avec James Cooley et un étudiant en post-doctorat recruté au MIT spécifiquement, Norman Brenner¹⁰⁸. La technique élaborée vise à séquencer la FFT pour gérer les entrées et sorties de données de la mémoire (limitée en taille et en vitesse) sans pénaliser le processus¹⁰⁹, seul moyen de calculer un spectre à partir des 512 000 points. La technique sera directement reprise pour les nombreux calculs des spectres planétaires des Connes, et à une très large échelle dans les systèmes utilisant la FFT, car la mémoire est un problème majeur des technologies informatiques.

Du côté de l'AFCRL (Air Force Cambridge Research Laboratories) à Cambridge (Massachusetts), Michael L. Forman implémente dès 1966 la FFT sur l'IBM7044, élabore un algorithme pour calculer les termes de Fourier dans l'ordre, réinvestit les techniques mathématiques de J. Connes et V. Nozal. Sa courte note dans le *Journal of the Optical Society of America* suffit à diffuser immédiatement ces nouvelles techniques numériques dans toute la communauté, et au-delà, parmi les spécialistes de l'optique de Fourier, c'est la volonté affichée de Forman¹¹⁰.

¹⁰⁶ Archive orale James Cooley – [https://ethw.org/Oral-History:James_W._Cooley consulté le 12/03/2019]

¹⁰⁷ Il y a quelques imprécisions dans l'entretien avec J. Cooley (cf note 106), et l'entretien avec J. Connes (réalisé par S. Christ – 4 juin 2018) permet de préciser cette implication dans l'organisation.

¹⁰⁸ Après une formation en mathématiques, N. Brenner a réalisé une thèse en planétologie au MIT, orientée sur la modélisation et l'analyse numérique. Il n'est pas à proprement parler un spécialiste de l'analyse de Fourier à ce moment-là.

¹⁰⁹ Quelques détails techniques dans (Cipra 1993).

¹¹⁰ (Forman 1966).

La trajectoire de J. Connes va également prendre une nouvelle tournure après ce premier temps des réalisations de la FTS. Jacquinot, devenu directeur du CNRS en 1962, lui demande de prendre la tête d'un autre tout nouvel instrument vers 1968 : le CIRCE – Centre Inter-Régional de Calcul Électronique – sur le campus d'Orsay. Elle prendra à bras le corps le pilotage du CIRCE, qui bénéficie donc de son expertise en calcul numérique et qu'elle renforcera par une veille scientifique et technique au niveau international.

Entre le LAC et le CIRCE s'opère une circulation de savoirs, savoir-faire et de personnes : Delouis, sous la direction de J. Connes, développe l'analyse numérique et la programmation informatique pour la FTS¹¹¹. Ils recourent à l'ordinateur IBM 360 du CIRCE. La circulation entre la spectroscopie au LAC et le centre de calcul scientifique intensif mériterait une recherche plus approfondie, dépassant le cadre de ce mémoire.

D. Des instruments mathématiques du calcul de spectres

À travers le développement de la FTS au LAC, on a vu que le chemin vers le calcul par ordinateur des transformées de Fourier semble très parallèle au développement des ordinateurs et de l'informatique aux États-Unis, en particulier avec les machines du constructeur IBM qui s'est imposé comme un fournisseur de premier niveau pour le calcul scientifique. Mais il serait trop simple de résumer ainsi ce cheminement et de le généraliser. Le monde des instruments mathématiques analogiques reste au fil des années 1950-60 la toile de fond de beaucoup de projets de recherche en FTS. Le physicien Jacquinot est baigné dans cet univers et il n'est certainement pas le seul. Il partage cette culture avec d'autres promoteurs de la FTS.

En France, il faudrait ajouter le contexte particulier entourant le calcul analogique, avec ses promoteurs comme Joseph Pérès et Lucien Malavard, qui ont fondé le Centre de Calcul analogique au sein de l'Institut Blaise Pascal du CNRS¹¹². Le calcul électronique numérique, les ordinateurs, dans les années 1950, ont beaucoup de mal à émerger dans le monde académique. Les faibles connaissances et compétences en la matière, le sous-équipement en calculateurs dans les laboratoires, et, pour tout dire, la faible demande en calcul scientifique émanant de la recherche en France, tout semble participer au manque de visibilité et de dynamisme de l'informatique en France et favorise *a contrario* les solutions de laboratoire, plus *ad hoc*. Chaque groupe, chaque contexte est différent, mais sur la question spécifique du calcul des spectres quelques points communs ressortent des multiples projets de ces physiciens, lesquels se répondent les uns les autres.

Nous allons explorer quelques lignées de conception d'instruments de calcul « physique » : électriques, optiques, électroniques. La perspective change très rapidement après 1965 avec l'algorithme de la FFT et grâce aux éclaircissements théoriques de pionniers comme J. Connes. Parce que le numérique, dans une combinaison de technologies électroniques et informatiques appuyée par la FFT, a tout emporté par la suite, ces instruments sont pour l'essentiel tombés dans l'oubli. C'est pourtant le foisonnement de ces solutions plus ou moins spécifiques qui ressort de notre enquête.

¹¹¹ Pour reprendre les termes de Janine Connes, Delouis « a établi le manuel du parfait petit fourériste ». Interview de J. Connes (4 juin 2018 – réalisée par S. Christ).

¹¹² Sur cet épisode du calcul scientifique et de l'informatique entre 1945 et les années 1960, nous nous inspirons très directement des analyses de (Pierre Mounier-Kuhn 2010).

Pour donner du sens à cette présentation, nous les ordonnerons en les catégorisant ainsi : d'abord les solutions qui sont une sorte de continuité de l'existant, des solutions « historiques » ou inspirées de traditions de recherche reconnues mais non liées *a priori* à la spectroscopie ; ensuite les solutions générées dans la culture du milieu de la spectroscopie, favorisant le recours à l'optique physique ; enfin les solutions d'un genre nouveau, liées à l'utilisation de l'électronique. Cette typologie rappelle la chronologie des évolutions au LAC, ce qui n'a rien d'une coïncidence, mais les chronologies sont toutes différentes d'un lieu à l'autre.

1. Dans la continuité de l'existant et des solutions « historiques »

a) *L'analyseur harmonique de Michelson et Stratton - 1898*

Un détour et un retour en arrière de quelques années permet de donner du sens à cet existant de 1950. En effet Michelson, en même temps qu'il a élaboré les principes de l'interférométrie à la fin du 19^{ème} siècle, a conçu quelques solutions pour la synthèse d'harmoniques, c'est-à-dire des moyens de produire des oscillations sinusoïdales et d'additionner (synthétiser) les composantes sinusoïdales. Ses instruments permettent le calcul de sommes de Fourier (synthèse) et des coefficients de Fourier (analyse) pour tout phénomène périodique.

Leur utilisation en spectroscopie, comme l'envisage Michelson, repose sur une méthode d'essais-erreurs. L'opérateur doit faire une hypothèse sur le spectre, introduire ces hypothèses dans l'appareil en ajustant les paramètres de chaque composante harmonique. Le système additionne et génère par cette synthèse une courbe à comparer aux mesures interférentielles pour valider, infirmer ou réorienter les hypothèses. En plusieurs itérations de la procédure, et donc par essai-erreur, le spectroscopiste obtient un spectre approché. Michelson l'utilise pour ses observations de l'effet Zeeman (séparation de raies spectrales sous l'effet d'un champ magnétique). Michelson obtient ses résultats grâce à l'analyse de plusieurs dizaines d'enregistrements de « visibilité » des franges, par spectroscopie interférentielle.

Michelson est typiquement dans un cadre de calcul analogique : simuler une variation (physique ou mathématique) par une variation qui lui est proportionnelle mais d'une autre nature. Michelson a exploré plusieurs types de systèmes : des pressions de fluides, des courants électriques, des forces mécaniques. Avant d'opter, avec Samuel W. Stratton (1861-1931)¹¹³, pour un appareil mécanique, utilisant des ressorts à spirale¹¹⁴. Le premier modèle comporte 20 composantes harmoniques, le second en comportera 80.

L'instrument est un peu hors normes, même si Michelson s'inspire des analyseurs et synthétiseurs harmoniques de Kelvin. Il est fragile car il est mécanique, et limité en précision

¹¹³ Collègue de Michelson, à l'Université de Chicago, et futur premier directeur du National Bureau of Standard américain (fondé en 1901).

¹¹⁴ Le fonctionnement de l'appareil est détaillé dans les originaux (Michelson et Stratton 1898a; Michelson et Stratton 1898b) et dans l'historiographie : (Bud et Warner (eds.) 1998, p. 305; Pierre Connes 1984, p. 74; Johnston 1991, p. 47 et chap. 3). A noter que l'appareil a été entièrement reconstruit et remis en fonctionnement par trois ingénieurs, montrant tous les rouages du système : (Hammack, Kranz et Carpenter 2014).

« The idea was to alternately stretch and release a series of springs in a cyclical fashion. Each spring in the series would be pulled at a specific frequency in order to simulate a light wave of a particular frequency. The set of springs would pull on a drum so as to rotate it; its rotation was countered by another large spring acting the opposite direction. The net rotation of the drum was indicated by a recording pen, and was the mechanical analogue of the resultant intensity of superposed sine waves. » (Johnston 1991, p. 47).

du fait de la faible qualité des ressorts. Cet analyseur-synthétiseur¹¹⁵ harmonique a été présenté à l'exposition universelle en 1900, construit à plusieurs exemplaires par Gaertner & Co. (Chicago). Il a connu des destinations multiples, hors de la spectroscopie, toujours pour l'analyse de spectres en acoustique. Sa petite commercialisation ne fait pas d'ombre à l'analyseur harmonique de Kelvin d'une part, ni aux plus petits modèles comme celui de Coradi ou Henrici, qui gagnent leur place dans les laboratoires par leur côté pratique, peu cher, simple à utiliser, d'autre part.

Tout ceci paraît presque anecdotique du fait du relatif « oubli » des acquis de la spectroscopie interférentielle imaginée par Michelson plus de 50 ans avant leur renouvellement. En revanche, en 1950, les analyseurs harmoniques mécaniques ne sont pas du tout oubliés, ils sont le seul écho persistant du temps de Michelson : ils font partie intégrante de l'existant et des instruments courants dans les laboratoires, embarquant des mathématiques de Fourier pour l'analyse harmonique de phénomènes périodiques.

b) La panoplie de l'analyse spectrale

Outre les analyseurs mécaniques (Thomson, Michelson, Coradi ... et leurs multiples variations), plusieurs artefacts sont disponibles dans la panoplie des spectroscopistes vers 1950 : les tables numériques, les analyseurs acoustiques et les analyseurs électriques ou électroniques. Les tables numériques idoines sont les bandes de Lipson-Beevers, que Fellgett utilise très tôt, et encore en 1957 pour les résultats présentés à la conférence de Bellevue¹¹⁶. Leur usage témoigne de la transposition d'une problématique de calcul de Fourier venue d'un autre domaine, et d'un artefact qui traverse une frontière disciplinaire. Fellgett ne se contente pas de les utiliser, comme une aide pour accélérer les calculs, il fait une analyse numérique du procédé¹¹⁷. Plus précisément il étudie les effets des approximations inhérentes à ces tables numériques dans le calcul numérique des transformées de Fourier : que se passe-t-il quand la fonction fait des « sauts » brusques ? Est-ce que des effets comme les phénomènes de Gibbs apparaissent de manière artificielle ? Ces analyses sont concomitantes aux travaux de Fellgett sur la programmation de l'EDSAC au Mathematical Laboratory de Cambridge, qui peuvent se voir comme des extensions et une automatisation de ces procédures numériques. Tous ces aspects seront rediscutés en abordant la question du développement des instruments de Fourier pour la cristallographie (ci-dessous, partie III).

c) Les analyseurs d'onde

L'analyse du son, et des harmoniques dans les sons, utilise une technologie connue, faite d'instruments dédiés et perfectionnés depuis les célèbres résonateurs de Koenig et Helmholtz¹¹⁸. George Vanasse, prolifique inventeur de solutions analogiques en FTIR, a proposé de réaliser l'analyse spectrale par un analyseur de son conventionnel : l'interférogramme est enregistré et relu avec une accélération temporelle de l'enregistrement qui permet de décaler les fréquences dans le domaine acoustique. La tentative est ingénieuse,

¹¹⁵ Un synthétiseur harmonique peut servir comme analyseur si la formule de calcul des coefficients de Fourier est décomposée, de manière approchée, en somme de Riemann : le calcul intégral devient une addition de composantes trigonométriques.

¹¹⁶ (Fellgett 1958a; Fellgett 1958b).

¹¹⁷ (Fellgett 1958a).

¹¹⁸ (Bud et Warner (eds.) 1998, p. 309).

mais Vanasse finira par se convertir, sous l'influence de Gebbie, au calcul numérique¹¹⁹. P. Connes relate également les tests de Jacquinot, lié à son passé scientifique en acoustique¹²⁰.

Plusieurs types d'analyseurs acoustique, mécanique ou électrique sont d'usage dans les laboratoires en 1950. Un analyseur électrique d'onde ou de fréquence est un filtre ajustable à bande étroite : c'est un filtre passif qui reçoit une onde électrique en entrée et produit un signal analogique sur un compteur. L'enregistrement de l'interférogramme sur un fil magnétique permet de repasser ensuite le fil à plus haute vitesse pour rentrer dans la gamme de fréquences de l'analyseur électrique. L'analyseur spectral de Tomas E. Firle est conçu en 1956 sur ce principe¹²¹. Les spectroscopistes adaptent des analyseurs connus à leurs besoins, dans une économie de moyens instrumentaux et dans une certaine continuité de pratiques.

2. Explorations des moyens de calcul optique

Tous les physiciens de la première génération de la FTS ont une expertise en spectroscopie et en optique. Il est peu étonnant que des solutions spécifiques soient cherchées dans cette culture technique particulière, débouchant sur des instruments plus ou moins aboutis. Les artefacts utilisés sont les lentilles optiques, les polariseurs, les filtres et les plaques photographiques. Ces différents composants sont combinés pour concevoir des instruments.

Au LAC, les spectroscopistes et opticiens, inspirés par les principes de l'optique de Fourier développés par le physicien français Pierre-Michel Duffieux (1891-1976)¹²², ont tenté l'enregistrement d'interférogramme sur une plaque photographique avec modulation d'intensité. La plaque, une fois développée, est illuminée avec un faisceau produit par une lampe à mercure et la figure de diffraction obtenue renseigne sur le spectre. La technique est assez rudimentaire, même si le principe de la diffraction comme moyen d'opérer une transformée de Fourier est théoriquement assis sur l'optique de Duffieux. Le tout est un peu en décalage avec les ambitions techniciennes de pointe de cette spectroscopie et restera un « bricolage » photographique. Il ressort malgré tout que le groupe a affleuré l'idée que l'optique de Fourier est également un instrument de Fourier. Cette perspective sera développée dans d'autres contextes et usages, notamment en cristallographie par diffraction de rayons X par W.L. Bragg.

a) L'« Optical Fourier Synthesizer » de Lawrence Mertz - 1956

Pionnier de la FTS, travaillant pour le fabricant Baird Associates Inc. (Cambridge – Mass.) Lawrence N. Mertz est un physicien particulièrement inventif à tous les niveaux de l'instrumentation, incluant, très tôt, la question de la détermination du spectre. En 1956 il élabore un instrument de synthèse de Fourier purement optique¹²³. Le boîtier produit des franges d'interférence de Young, dont l'amplitude et la phase sont ajustables, et dont l'impression sur plaque photographique varie de manière sinusoïdale. L'appareil est construit autour d'un

¹¹⁹ (J. Strong 1984, p. 103).

¹²⁰ (Pierre Connes 1992; Pierre Jacquinot 1954b, p. 25).

¹²¹ Des très basses fréquences sont démultipliées pour obtenir un signal électrique analysable pour un analyseur d'onde électrique dans les fréquences acoustiques classiques. C'est une combinaison astucieuse de plusieurs dispositifs : « The frequency shift is achieved by recording the low-frequency phenomenon on photographic film in the form of a variable-area recording. The film is played back at a greatly increased rate, modulating a phototube current which is fed into an analyzer. » (Firle 1956).

¹²² Voir partie IV.H.1, p. 205, pour les détails sur ce physicien et les travaux en optique de Fourier, datant des années 1940.

¹²³ Son « Optical Fourier Synthesizer » (Lawrence Mertz 1956).

prisme de Wollaston, déplaçable dans le compartiment (Figure 7 et Figure 8) : c'est ce déplacement qui contrôle les paramètres des franges produites. Les franges sont superposées successivement par exposition sur une plaque photographique, en faisant varier les paramètres pour chacune des franges (espacement entre franges, position des franges, temps d'exposition) afin de produire une synthèse (addition sur la plaque photographique) de composantes de Fourier (Figure 9). L'appareil permet de superposer quelques centaines d'harmoniques.

Au fond, c'est une forme adaptée de techniques utilisées par W. L. Bragg dans le domaine de la diffraction par rayons X. Bragg utilisait des masques imprimés en négatif et les superposait : par rétro-éclairage les franges s'additionnent et réalisent une synthèse de Fourier. Entre spectroscopie et cristallographie, les instruments de Fourier comme les bandes de Lipson-Beevers ou les moyens du calcul optique, semblent circuler facilement.

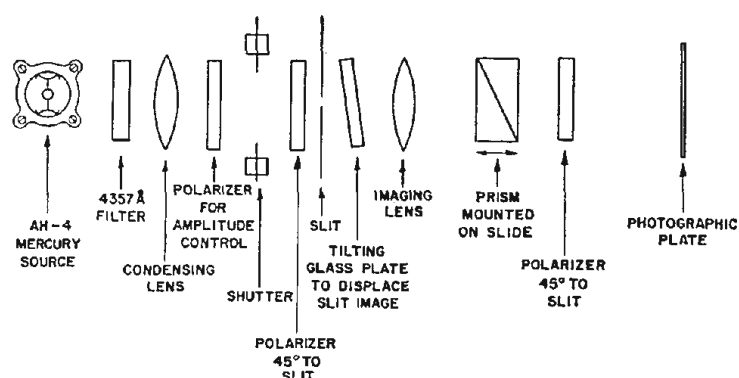


Figure 7- Principe du Synthesizer de Mertz – Source : (Lawrence Mertz 1956, p. 549).

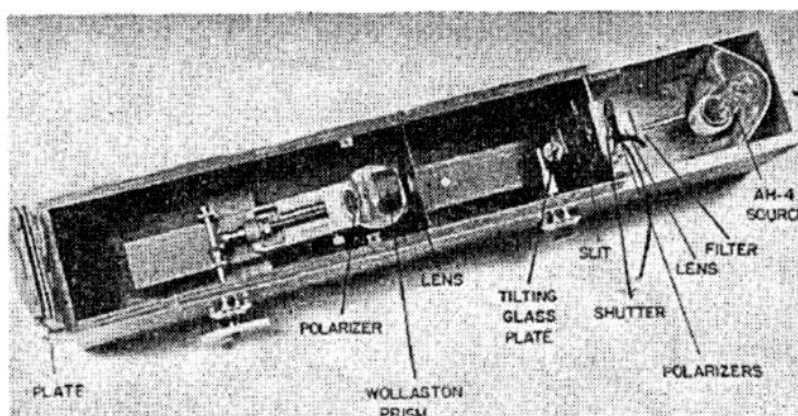


FIG. 3. The actual construction of the Fourier synthesizer.

Figure 8- Réalisation du Synthesizer de Mertz – Source : (Ibid.).

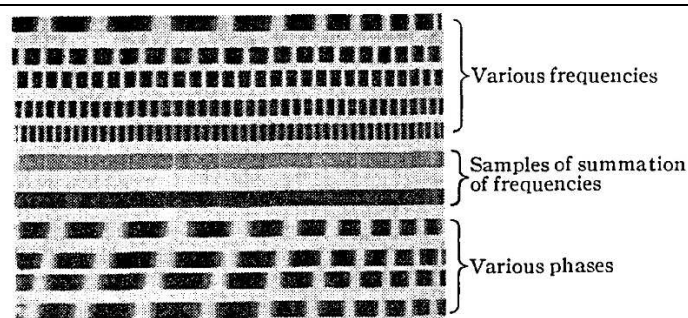


FIG. 6. Samples of fringes generated by the synthesizer, giving an idea of the ranges in frequency and phase available. The aberrations are evident in the dispersion of frequency of the fringes across the plate. The ability to sum frequencies is, however, promising.

Figure 9- Franges obtenus avec le Synthesizer de Mertz – Source : (Ibid., p. 551).

Ce type de système optique a un défaut qui s'avèrera récurrent, celui du manque de précision, qui n'est pas rédhibitoire en 1956, mais le deviendra bientôt et sera dépassé par les systèmes concurrents, analogiques ou numériques confondus.

b) L'« Optical analogue Fourier transformer » - 1967 – Edgar, Lawrenson, Ring

Autre contexte, autre projet¹²⁴ : trois physiciens de l'Université de Hull (GB) R. Edgar, B. Lawrenson et J. Ring ont adapté l'idée d'un système de l'opticien Adolf W. Lohmann (1926-2013)¹²⁵, exploitant les propriétés des franges de Moiré (deux grilles identiques positionnées en léger décalage l'une de l'autre – voir Figure 10). Les franges de Moiré ont un facteur de transmission qui varie de manière sinusoïdale et qui est ajustable en fonction de l'angle entre les deux grilles : elles constituent l'artefact central de cet instrument de Fourier.

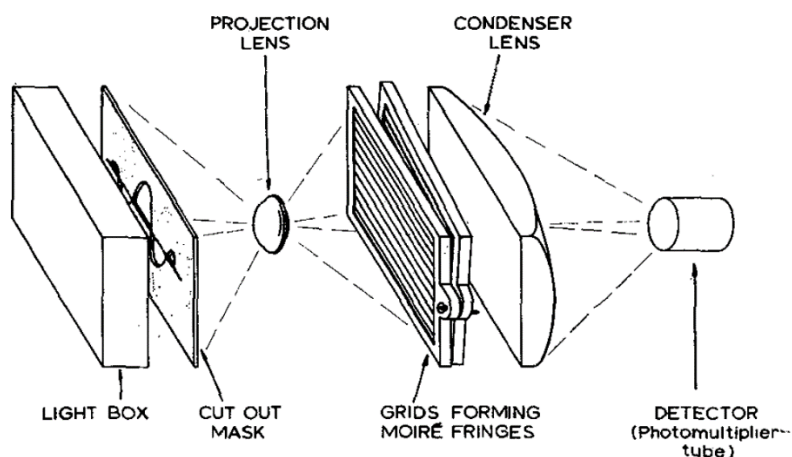


Figure 10- Principe de l'utilisation de franges de Moiré, en transmission – Source : (Edgar, Lawrenson et Ring 1967, p. 73).

¹²⁴ (Edgar, Lawrenson et Ring 1967).

¹²⁵ (Lohmann 1959).

Elaboré vers 1964, le projet de Hull est pris dans un contexte de compétition de plus en plus prégnante avec l'ordinateur, potentiellement plus versatile et plus précis, mais d'un accès difficile et dont l'utilisation n'est ni pratique, ni rapide. C'est sur l'usage que le système analogique veut faire la différence. Il est pensé comme un organe en connexion la plus directe possible avec le spectroscope. Il doit rivaliser en précision avec l'ordinateur, dans l'apodisation et les filtrages possibles. Dans le principe, il faut découper un masque dans du papier noir, dont la forme reproduit l'enregistrement de l'interférogramme (Figure 11). Puis insérer le masque dans un système automatisé qui éclaire le masque, faire varier les franges de Moiré et enregistrer l'intensité transmise, à l'aide d'un photomultiplicateur, laquelle donne le spectre (Figure 12 et Figure 13). Il faudrait indiquer toutes les subtilités du système pour voir à quel point la réflexion mathématico-optique oriente la conception. Donnons seulement deux exemples, visibles sur le masque. Le rectangle tracé dans le masque a une fonction précise, celle de générer une intensité constante dans le photomultiplicateur qui s'ajoute au résultat recherché : cette constante décale le résultat et assure que les valeurs transmises sont toujours positives. Il faut soustraire cette constante au résultat enregistré pour avoir le résultat final. Deuxième exemple et deuxième possibilité de traitement optique : le masque de l'interférogramme a deux parties, une positive au-dessus de la ligne médiane, une négative sous la ligne. Pour obtenir la bonne combinaison, il est judicieux d'enregistrer séparément les transmissions des parties positives et négatives pour les soustraire ensuite ; ou encore éclairer chaque partie avec deux sources séparées, qui flashent en anti-phase, puis recombinaison des signaux de sortie.

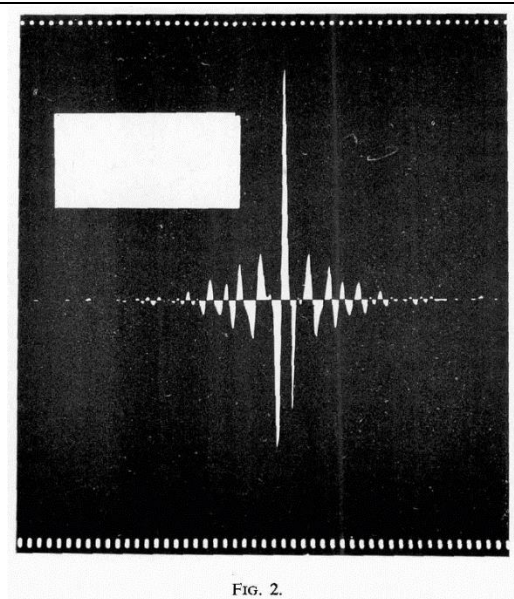


FIG. 2.

Figure 11 - Masque réalisé à partir d'un interférogramme – Source : (Ibid., p. 75).

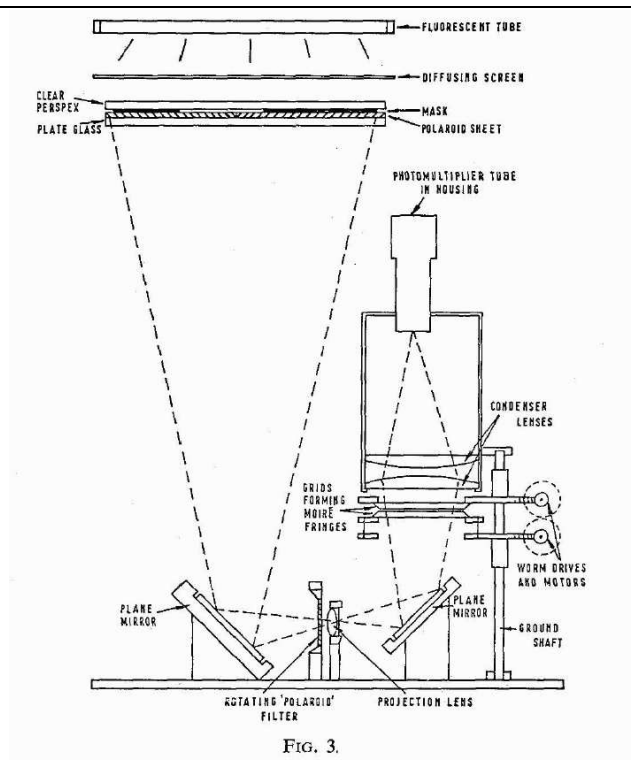


Figure 12 - Principe du calculateur optique analogique de transformée de Fourier – Source : (Ibid.).

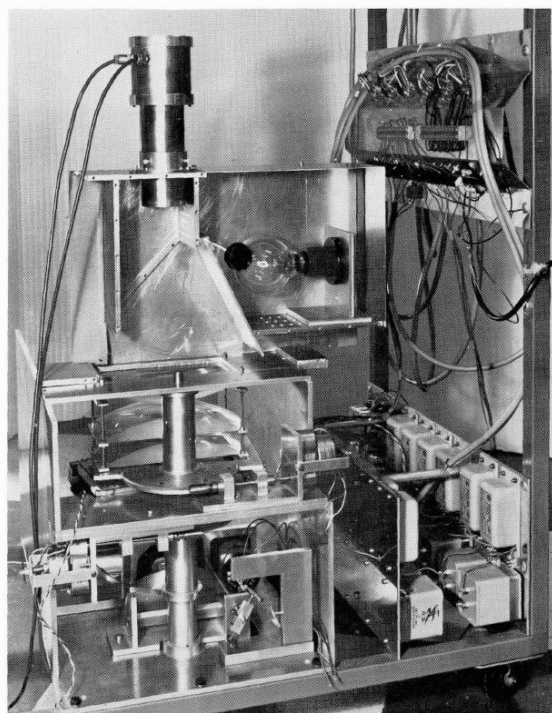


Figure 13– Réalisation du calculateur optique analogique de transformée de Fourier – Source : (Ibid., p. 76).

Au final, le système est une combinaison pleine d'astuces et il constitue la dernière véritable génération de système analogique avant la bascule dans le numérique avec la FFT. Il

témoigne de la créativité exceptionnelle en optique physique pour imaginer des solutions *ad hoc*, orientées par les mathématiques de Fourier en jeu. Et il doit s'inscrire dans une histoire qui traite de l'optique de Fourier et du traitement optique de l'information – dont A. Lohmann, inspirateur du principe, est un emblématique représentant : ce sera une perspective à développer à propos de l'histoire globale des instruments de Fourier.

3. L'arrivée de l'électronique

Dans les projets évoqués ci-avant, dans les développements au LAC, dans les systèmes recourant aux ordinateurs, l'électronique s'impose sur plusieurs plans de l'instrumentation en FTS simultanément, aussi bien sous sa forme analogique que numérique. C'est en tout cas un ensemble d'artefacts nouveaux qui s'introduisent dans la conception instrumentale, avec des rapports différents aux savoirs mathématiques de Fourier.

a) *Le calculateur analogique multi-canaux de Strong et Vanasse - 1957*

Autour de J. Strong, à l'Université Johns Hopkins l'équipe organise des recherches pour déterminer les spectres à partir des interférogrammes par des moyens numériques et analogiques. C'est à l'image des enjeux qui traversent la petite communauté de la FTIR, en débat récurrent depuis 1957 lors de la conférence de Bellevue. Gebbie, Vanasse et Strong présentent un système de modulation interférentielle qui n'utilise pas l'interféromètre de Michelson, mais des réseaux lamellaires pour un spectromètre¹²⁶ qui génère toujours un interférogramme à inverser pour obtenir le spectre. Leurs résultats obtenus sur IBM 650¹²⁷ ont été publiés antérieurement. À Bellevue ils détaillent la conception de leur calculateur analogique dédié¹²⁸. Les raisons qui fondent leur projet sont d'ordre pratique et économique : le coût du calcul numérique sur ordinateur type IBM est très élevé et les délais de réalisation sont très longs. Le calculateur analogique de 1957 doit tirer un avantage sur ces deux plans : rapidité du résultat et faible coût. Le système analyse le signal du détecteur en même temps qu'il est enregistré.

Les figures montrent un canal du calculateur analogique (le système étant constitué de 10 canaux – voir Figure 14 et Figure 15). Chaque canal traite une bande de fréquence réduite, étroite. Le signal est modulé par un interrupteur inverseur (multiplication par un signal carré), puis un filtre qui écarte les harmoniques impairs. Le signal amplifié est intégré par le système mécanique à sphère et disque, et le compteur indique le résultat sous forme numérique. Le nombre affiché est proportionnel à l'intensité des composantes spectrales d'une longueur d'onde fixée. Le schéma montre très clairement cet ensemble de traitements mathématico-électroniques et intégration mécanique subit par le signal. Qui plus est, l'intégration reprend un système mécanique sphère-disque¹²⁹ classique depuis les analyseurs harmoniques de Kelvin.

L'instrument est donc une hybridation de systèmes analogiques et numériques, de systèmes mécaniques éprouvés et d'une électronique au goût du jour. Le tout est sous contrôle

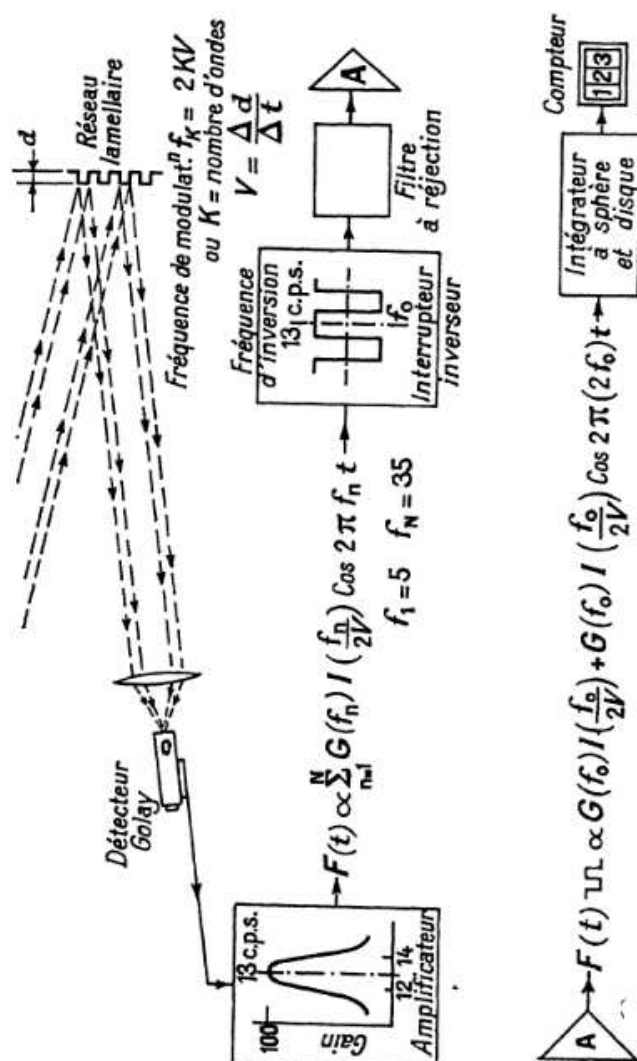
¹²⁶ L. Mertz qualifie ce système d'interféromètre à peigne (et le voit comme une extension d'un interféromètre de Rayleigh).

¹²⁷ (Gebbie et Vanasse 1956; John Strong 1957). Ordinateur IBM 650 à Binghamton, New York.

¹²⁸ (J. Strong et Vanasse 1958).

¹²⁹ En l'occurrence c'est un système commercialisé par l'entreprise Librascope installée à Glendale (Californie).

mathématique, le fil directeur du traitement du signal permettant de s'affranchir, le temps de la conception, de la nature matérielle de ces traitements successifs.



L'indication du compteur est alors :

$$R \propto \int_0^T G(f_0) I\left(\frac{f_0}{2V}\right) dt + \int_0^T G(f_0) I\left(\frac{f_0}{2V}\right) \cos 2\pi(2f_0)t dt.$$

Mais comme $T > 10$ s, le second terme est $< 0,1 \%$

donc

$$R \propto G(f_0) T I\left(\frac{f_0}{2V}\right)$$

ou

$$I\left(\frac{f_0}{2V}\right) \propto \frac{R}{G(f_0) T}$$

$$\text{où } T = \frac{2D}{V},$$

D = profondeur maximum des sillons,
 V = vitesse constante d'entraînement.

FIG. 2. — Schéma de l'un des canaux du calculateur analogique.

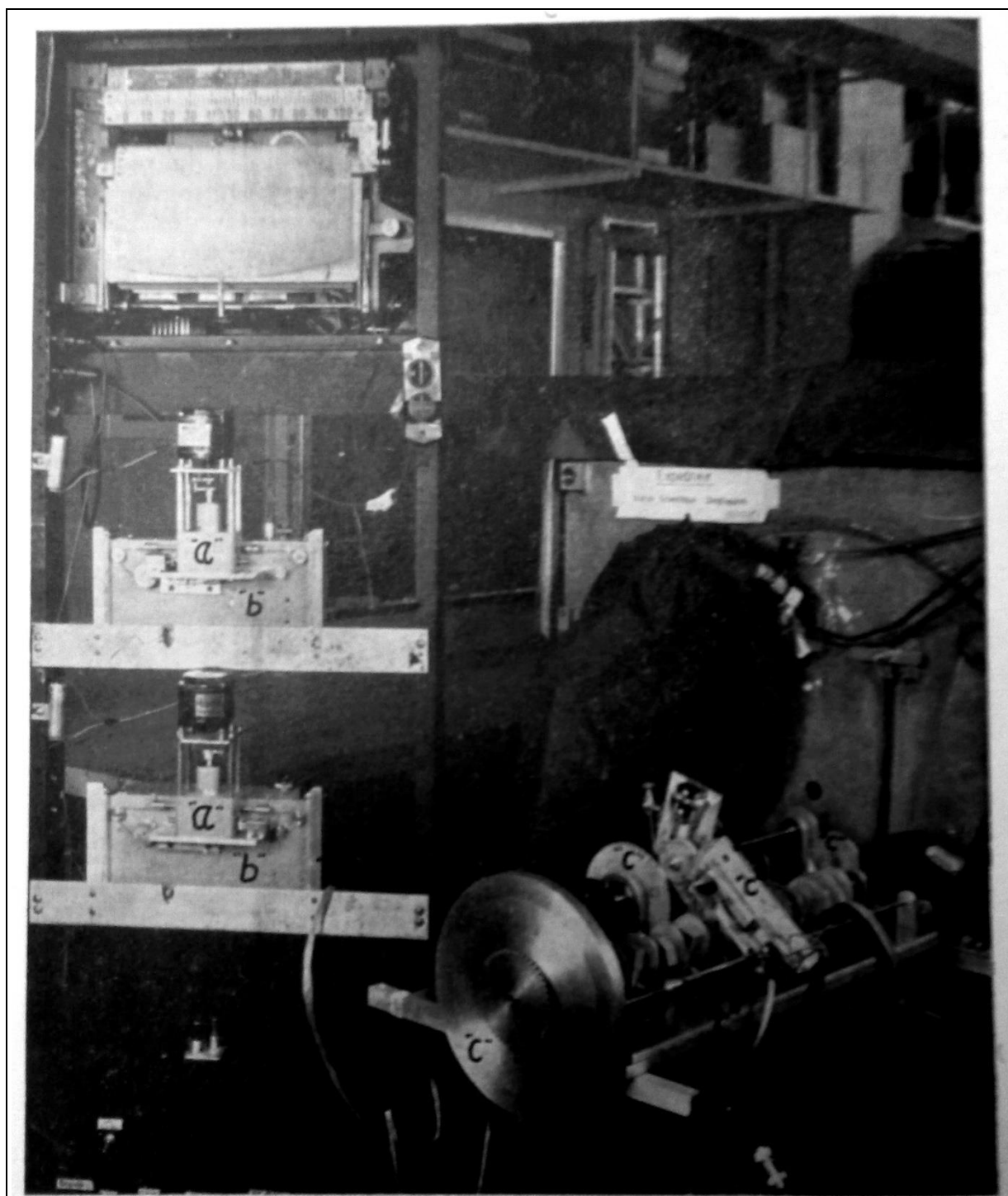


Figure 15 - Photographie de deux canaux du calculateur analogique – Source : (Ibid., p. 194).

a) Intégrateur à bille et disque. - b) Servo-mécanisme Varian. - c) Interrupteurs et transmission à vitesse variable

b) IFTAC¹³⁰ - Idealab Fourier Transform Analog Computer - présenté en 1967

Autre contexte, autre calculateur : l'IFTAC, un calculateur analogique dédié à la transformée de Fourier, est produit par la petite entreprise Idealab Inc., fondée en 1955 pour fabriquer des instruments optiques et spécifiquement des interféromètres. Il est le produit à la fois d'un territoire, le Massachussets (Université d'Harvard, MIT et le tissu socio-économique alentour) et déjà de la courte histoire des systèmes analogiques pour la FTIR. En effet IFTAC est le fruit de la collaboration d'Idealab avec G. Vanasse et H. Sakai, tous deux physiciens à l'Optical Physics Laboratory - Air Force Cambridge Research Laboratories (AFCRL). Cette collaboration est à l'image du financement important de l'AFCRL dans le domaine et de son implantation¹³¹ : émanation du MIT Radiation Laboratory et du Harvard Radio Research Laboratory en 1945, il concentre après la seconde guerre mondiale une expertise dans différents champs technologiques de pointe, dont l'électronique, irriguant le Massachussets de ses collaborations¹³². Ajoutons que Vanasse, depuis son départ du groupe de J. Strong, est un des tenants de solutions analogiques en FTS, ce qu'il développe dans les projets à l'AFCRL.

L'IFTAC est un système entièrement électronique : un système potentiométrique pour multiplier la fonction d'entrée par des sinus et cosinus, puis un intégrateur électronique à base d'amplificateurs opérationnels (voir Figure 16). Les artefacts électroniques réalisent les calculs des fonctions trigonométriques, les intégrations, les opérations algébriques, donc toute l'analyse de Fourier nécessaire.

¹³⁰ (Pritchard et al. 1967).

¹³¹ Pour (Johnston 1991, p. 104) l'AFCRL est un centre de développement et de financement (projets, instruments, publications, colloque d'Aspen en 1970, etc.) de la FTS sur toute la période des années 1960 et 1970.

¹³² L'AFCRL est un des plus grands laboratoires de recherche de l'US Air Force (600 employés au tournant de 1970), avant sa progressive transformation dans les années 1970. (Altshuler 2013)

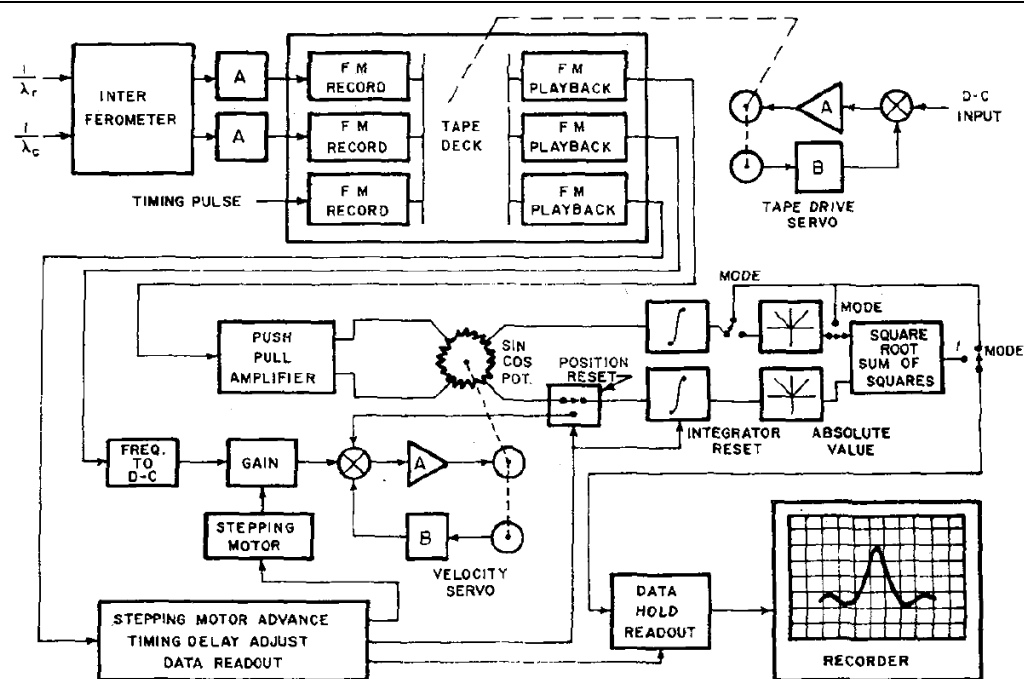
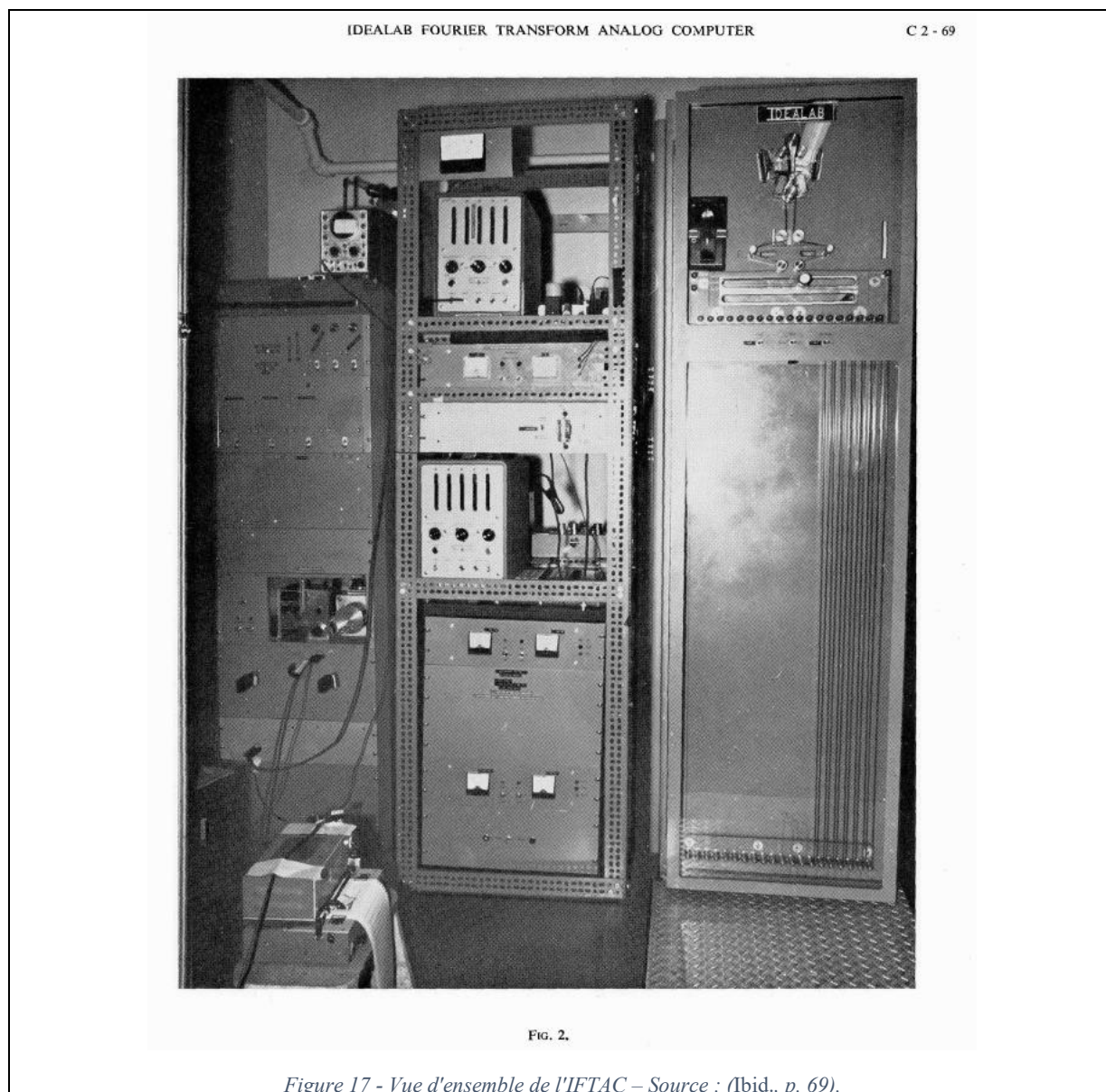


FIG. 1.

Figure 16 - Schéma bloc du principe de l'IFTAC - Source : (Pritchard et al. 1967, p. 68).



À la complexité électronique correspond nombre de sources d'erreurs potentielles dans les calculs : le bruit dans les circuits, la mauvaise synchronisation, les erreurs dans la base de temps, les dérives en température influencent les performances de l'électronique. La mise en œuvre de ces calculateurs impose autant de calibrages et de contrôles qu'il y a de sources d'erreur. En d'autres termes le changement complet de l'artefact, devenu électronique, exige une analyse mathématique plus précise autant pour valider les détails des calculs que pour orienter la conception de l'instrument.

c) Vers le « temps réel » : le projet Hoffman et Vanasse à l'AFRL- (1966-69)

Après l'IFTAC, et toujours face à la montée en puissance des calculateurs numériques, le groupe de l'AFRL va fixer un nouvel objectif pour la recherche pilotée par Vanasse : la possibilité de calculer les spectres en temps réel. Les systèmes analogiques ont toujours une longueur d'avance sur ce plan-là et comme il est devenu impossible de rivaliser sur la précision des calculs, c'est l'accessibilité, la facilité d'utilisation et les nouveaux usages qui font la force de l'analogique. Le recours à l'ordinateur impose par ailleurs un enregistrement intermédiaire

de l'interférogramme avant transmission sur ordinateur, d'autant plus long que l'ordinateur n'est pas forcément à proximité de l'interféromètre.

Au sein de l'AFCRL, J. Hoffman développe sur la période 1965-70 un « synthétiseur temps réel de spectre pour la spectroscopie de Fourier »¹³³. L'instrument portable, et « temps réel », hybride analogique-numérique, repose sur le principe de synthèse du spectre par superposition de fonctions trigonométriques dont les fréquences et amplitudes sont déterminées à partir de l'interférogramme. Le prototype fonctionne en 1966 et un modèle plus abouti est fabriqué en 1969 incluant les modules d'apodisation. Une étude comparative de 1969 confronte les performances respectives des trois systèmes : l'ordinateur, un système analogique dédié (IFTAC) et le système temps réel. Sans surprise, cela montre que le spectre est déterminé en 8 minutes sur le dernier, en 16 heures pour le calculateur spécialisé et le « lendemain » pour l'équivalent numérique.

E. Hybridations informatiques

Qu'ils soient développés ou perfectionnés avec des moyens mécaniques, optiques ou électroniques, les systèmes analogiques sont de plus en plus pensés et conçus en rivalité avec la puissance de calcul digital croissante des ordinateurs. Mais cette rivalité se transforme progressivement en complémentarité car les instruments doivent être adaptés à un traitement informatique. Ce qui ne disqualifie donc pas l'analogique, mais le situe plus résolument en amont du traitement numérique. Car les fonctions informatiques sont de plusieurs ordres : le calcul des transformées de Fourier, le système de contrôle et d'automatisation de l'instrument, les systèmes de conversion analogique-numérique, les organes d'enregistrement de l'interférogramme et des résultats de calcul, incluant la visualisation des résultats.

Il s'agit là d'une transformation très générale de l'instrumentation scientifique des années 1970-1980, que nous chercherons à analyser à travers plusieurs autres trajectoires dans ce mémoire. Dans le registre de la FTS on peut en donner quelques exemples emblématiques, qui marquent des étapes de cette transformation progressive, ainsi que des usages spécifiques mais ne prétendent à aucune exhaustivité, tant le nombre d'instruments s'accroît dès le milieu des années 1960.

1. Evolution de la rivalité analogique – numérique

Le sentiment de rivalité ou de supériorité du numérique est en fait très variable d'un protagoniste à l'autre, au fil des années 1954-1970. Néanmoins, cette rivalité est affichée dès le colloque de Bellevue en 1957. La remarque vient de Fellgett, dont le capital symbolique est très élevé étant donné qu'il est considéré comme un des « pères fondateurs » du principe de FTS. Critiquant les solutions analogiques de Strong-Vanasse, il affirme¹³⁴ :

Dans le système qui vient d'être décrit on observe simultanément 10 éléments spectraux et on répète l'exploration par exemple 10 fois pour obtenir 100 éléments au total ; ainsi l'analyse par un procédé analogique coûte 10 fois plus de temps qu'elle ne devrait. D'autre part, je pense que la question du calcul par machines numériques a évolué très rapidement ces dernières années. La machine EDSAC II de Cambridge peut calculer en une minute plusieurs points de la transformée de Fourier à partir de 1100 ordonnées mesurées sur

¹³³ (Hoffman et Vanasse 1966) et (Hoffman 1969).

¹³⁴ Discussion qui suit (J. Strong et Vanasse 1958, p. 195).

l'interférogramme, et je regrette maintenant le temps que j'ai passé à essayer de réaliser des machines analogiques.

Fellgett est alors déjà plongé dans le milieu du Cambridge Mathematical Laboratory, avec la construction de l'EDSAC II en parallèle du développement de la cristallographie par rayons X, autrement dit un contexte dans lequel le calcul électronique digital se développe à très grande vitesse.

Dans l'autre grand évènement structurant de la communauté, au colloque d'Aspen en 1970, la tonalité générale est claire dès l'introduction d'E. Loewenstein, qui livre une synthèse de vingt années de perfectionnement de la FTS. Il conclut par une phrase sans ambiguïté¹³⁵ :

The overriding factor in computation for Fourier Spectroscopy today is the fast Fourier transform or Cooley-Tukey algorithm, which has changed the computational problem from one of cost to one of finding a computer with sufficiently large memory capacity to do the desired transforms. [...] This fact has also served to make irrelevant any discussion of analog computers, which have been so laboriously constructed in several laboratories.

Seul interstice restant à Aspen, entre l'analogique et le numérique, sont les solutions dédiées (rares) et surtout la perspective du traitement « temps réel ». Dernière étape avant que les mini-ordinateurs, et bientôt les micro-ordinateurs, soient suffisamment puissants pour faire tous les calculs en temps réel.

2. Hybridations analogique-numérique

De l'opposition entre analogique et numérique, les concepteurs d'instruments sont passés à une réflexion sur la complémentarité des systèmes techniques : complémentarité des usages d'une part, complémentarité technique d'autre part, celle qu'on peut détailler maintenant. Car si l'horizon se dégage vers un « tout » numérique, il n'est pas accessible directement : l'instrumentation ne peut faire l'économie de l'étape d'hybridation et d'adaptation progressive des instruments au numérique. D'une certaine manière, la matérialité de l'interféromètre est un incontournable : l'artefact et son mode d'usage produisent un instrument qui calcule analogiquement une transformée de Fourier, passant du spectre de la source ou de l'échantillon, à l'interférogramme. Quel que soit le mode de conception, il ne peut s'agir que d'adapter ce système analogique au mieux au calculateur numérique. Ce qui n'a rien de simple en réalité, comme l'illustrent quelques exemples de réalisations ci-dessous.

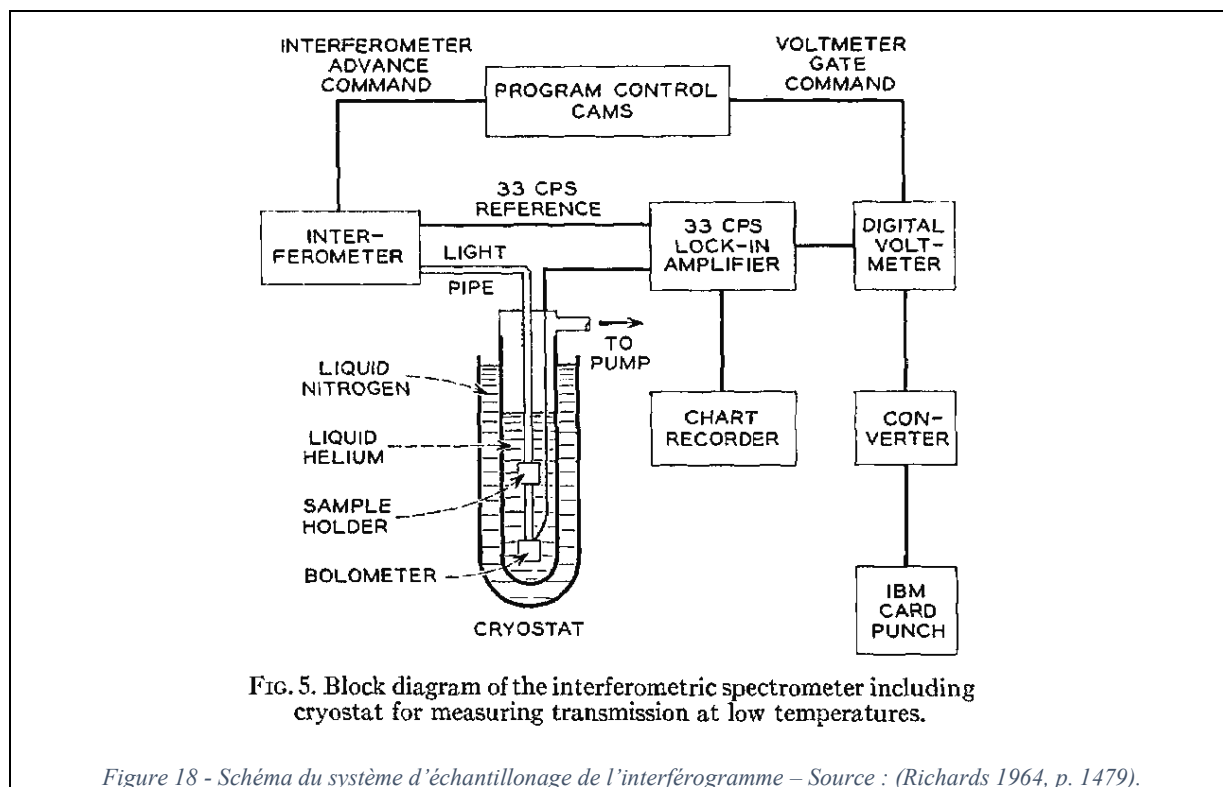
a) High-Resolution Fourier Transform Spectroscopy in the Far-Infrared - P. L. Richards - 1964

P.L. Richards travaille aux Bell Labs, au sein du groupe de Physique du solide, dans les années 1960, à la conception d'un instrument de référence pour la spectroscopie dans l'infrarouge lointain¹³⁶. Étant donné les moyens dont disposent les Bell Labs, le calcul numérique s'effectue sur IBM 7094 machine parmi les plus performantes du moment. Un des enjeux se situe en amont du calcul numérique : assurer la qualité de la transmission de l'information au calculateur. La particularité de la machine des Bell Labs se trouve du côté du mode d'enregistrement de l'interférogramme et de l'échantillonnage, première étape de la conversion du signal en numérique qui consiste à relever périodiquement des valeurs du signal. Le système est automatisé pour enregistrer le signal sur cartes perforées, destinées au traitement sur IBM

¹³⁵ (Loewenstein 1970, p. 17).

¹³⁶ (Richards 1964).

7094. Le schéma (Figure 18) du système suffit à prendre la mesure de sa complexité pour assurer la plus haute résolution possible dans les résultats. L'échantillon est placé dans un cryostat, éclairé par la lumière sortant de l'interféromètre et un bolomètre capte la lumière transmise par l'échantillon. Le signal est amplifié électroniquement puis échantillonné numériquement, converti et perforé sur des cartes.



À l'autre bout de la chaîne de mesure, les calculs sur ordinateur permettent une présentation analytique des résultats, et sont facilement imprimables par les périphériques informatiques classiques. Richards souligne d'ailleurs que là réside aussi une des qualités du traitement numérique (« one of the major advantages »¹³⁷). Cet instrument de 1964 est opérationnel dans l'infra-rouge lointain, choix de conception de Richards, qui traduit aussi son scepticisme quant à la possibilité de faire un instrument équivalent dans l'infra-rouge proche, à cause du temps et du coût du calcul numérique¹³⁸.

b) Fourier Transform Computer FTC-100 : calculateur hybride dédié - 1964

Le système FTC-100 est à l'image des perspectives naissantes en matière de mise sur le marché de FTS. Le projet est élaboré du côté de Beckman Instruments Inc., piloté par Ridyard (localisé chez RIIC « Research and Industrial Instruments Company » la filiale de Beckman à Londres)¹³⁹. Il repose sur une modularité de l'instrument, une séparation entre la partie

¹³⁷ (*Ibid.*, p. 1481).

¹³⁸ Richards compare les performances des spectromètres à réseaux et FTS dans le proche infra-rouge, concluant à la supériorité des résultats des premiers : l'échantillonnage des spectres génère beaucoup plus de données, et demande des heures de calcul (à plusieurs \$100 de l'heure) même sur l'IBM7094 (*Ibid.*, p. 1483).

¹³⁹ (Ridyard 1967).

proprement optique et l'organe informatique. Le tout s'inscrit dans une progressive stabilisation et même une standardisation de la FTS. Le FTC-100 peut en effet être adjoint à un système interférométrique FS-620 de Block Engineering ou à un LG-100 (Lamellar Grating – interféromètre à réseau).

Dans tous les cas l'interférogramme est converti en signal digital (A/D converter – 12 bits) qui est enregistré dans une mémoire rapide du FTC-100 : deux racks de mémoire en tores de ferrite de capacité 1024 mots (de 12 bits) pour stocker en série les données de la cellule de Golay. Il s'agit du système de mémoire vive le plus courant à cette époque dans les ordinateurs. L'analyse spectrale se fait par morceaux successifs de l'interférogramme : les données sont reconverties en signal analogique pour passer dans un analyseur analogique, et l'opération se déroule pas à pas grâce au stockage numérique en mémoire vive. Le résultat est directement imprimé. L'intérêt du système tient donc à la capacité de stockage numérique qui fait une sorte de tampon. Il est possible de faire l'analyse et la comparaison de deux signaux dans les racks de tores de ferrite (capacité étendue à 20kbits) ou encore d'ajouter des éléments déjà numérisés directement dans le FTC-100. Le FTC-100 incarne la combinaison de la souplesse du numérique et de la rapidité de l'analyse analogique (Figure 19).

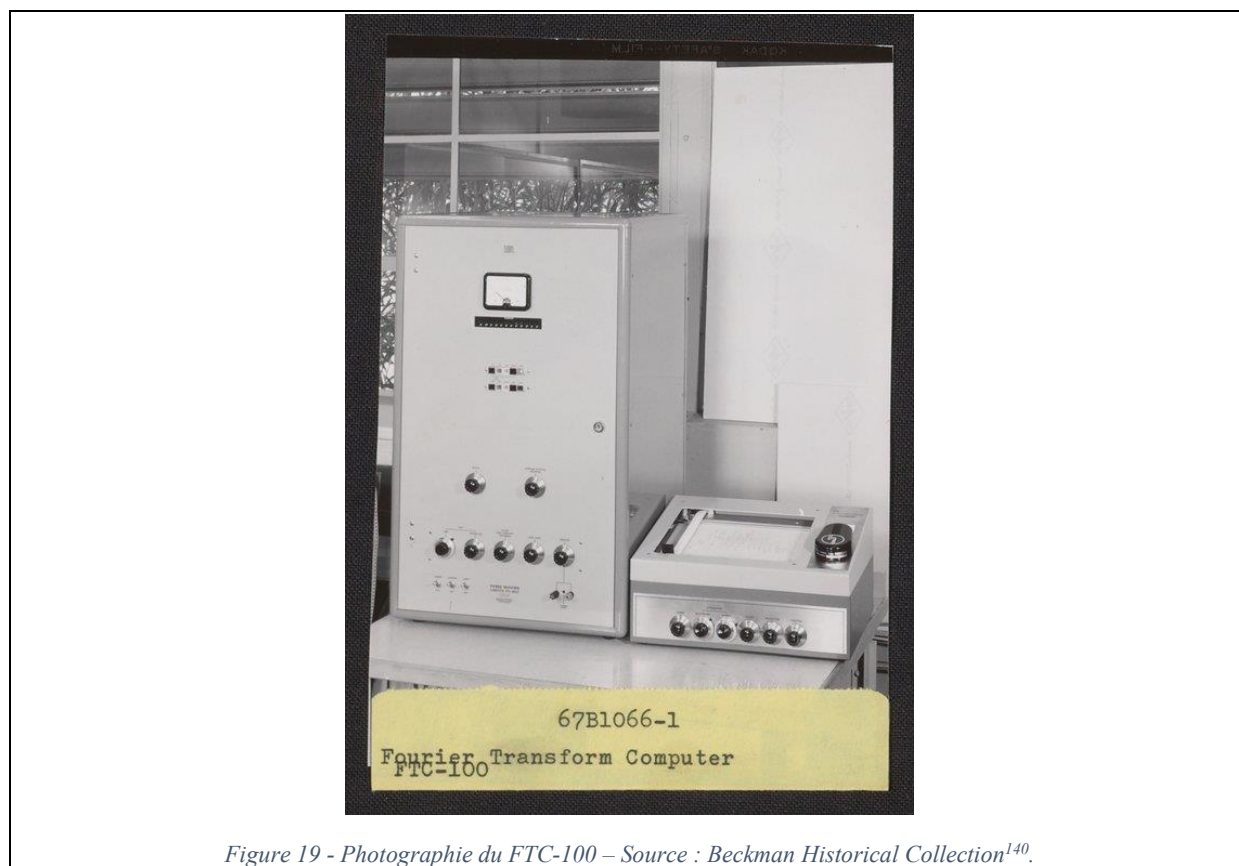


Figure 19 - Photographie du FTC-100 – Source : Beckman Historical Collection¹⁴⁰.

¹⁴⁰ Beckman Instruments Photographic Services Section. « Beckman FTC-100/7, Fourier Transform Computer », 1967. Beckman Historical Collection, Box 86. Science History Institute. Philadelphia.
[URL : <https://digital.sciencehistory.org/works/1g05fc06v> consulté le 10/05/2019].

c) Une extension, le FTC-300 - 1967

La génération suivante de FTC¹⁴¹ est constituée de deux modules : FS-300 et FDP-300 (voir Figure 20). La partie FS-300, partie supérieure de la machine, contient l'électronique nécessaire à la mise en opération et au contrôle des interféromètres (FS-720, FS-820 ou LR-100) et produit un interférogramme numérisé dans la foulée. Celui-ci peut être enregistré soit sur cartes perforées (pour traitement informatique externe), soit sur la mémoire à tore de ferrite interne. Le FDP-300 est une unité de « data processing », qui traite les données grâce à l'électronique logique, convertisseur numérique-analogique et analyseur harmonique analogique. Jusqu'à l'impression du spectre de l'interférogramme.

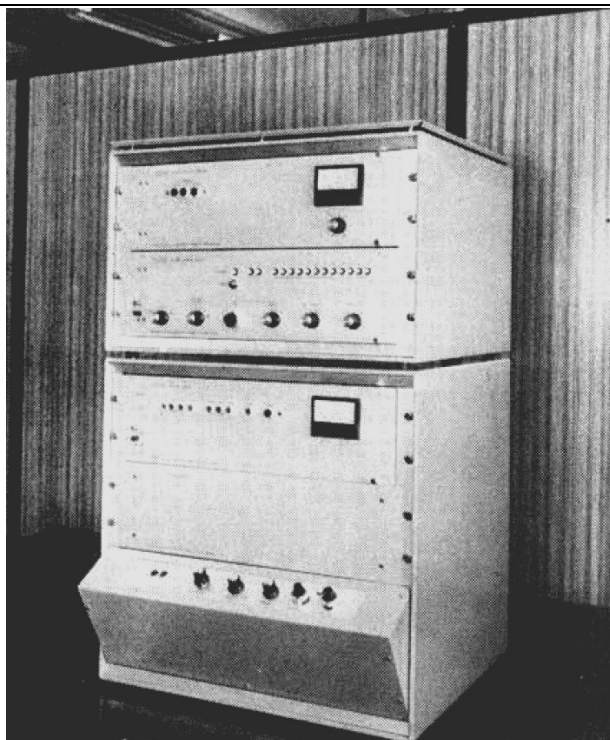


Figure 20 - FTC-300 et ses deux modules assemblés – Source : (Low 1970, p. 348).

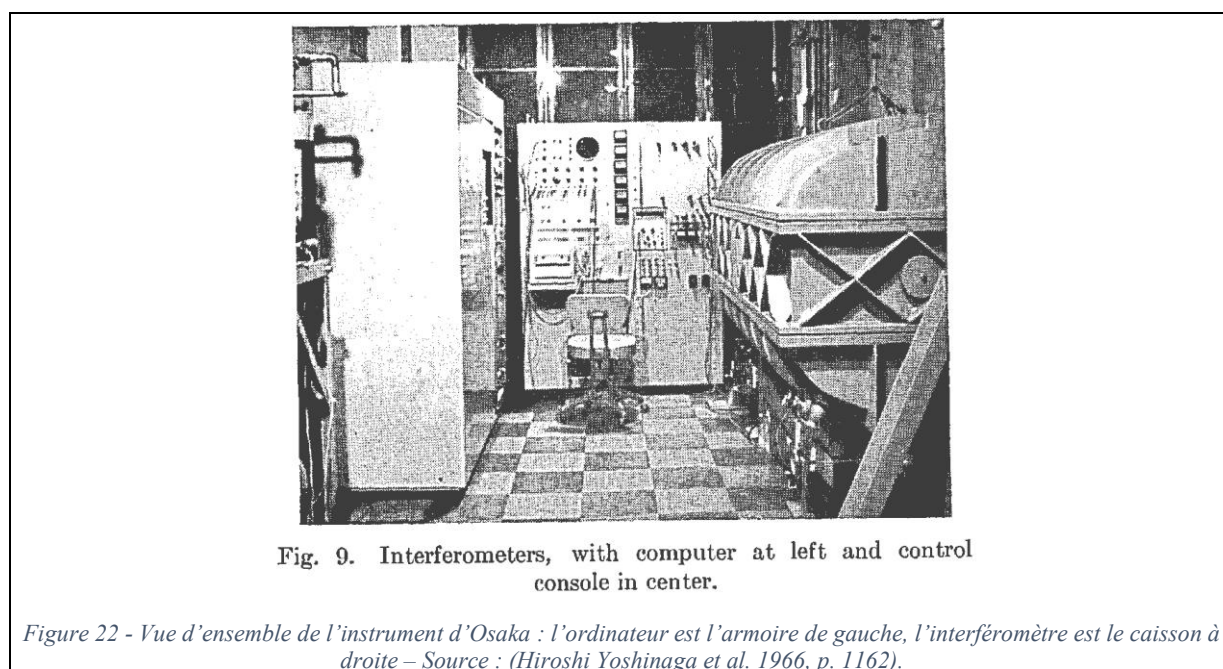
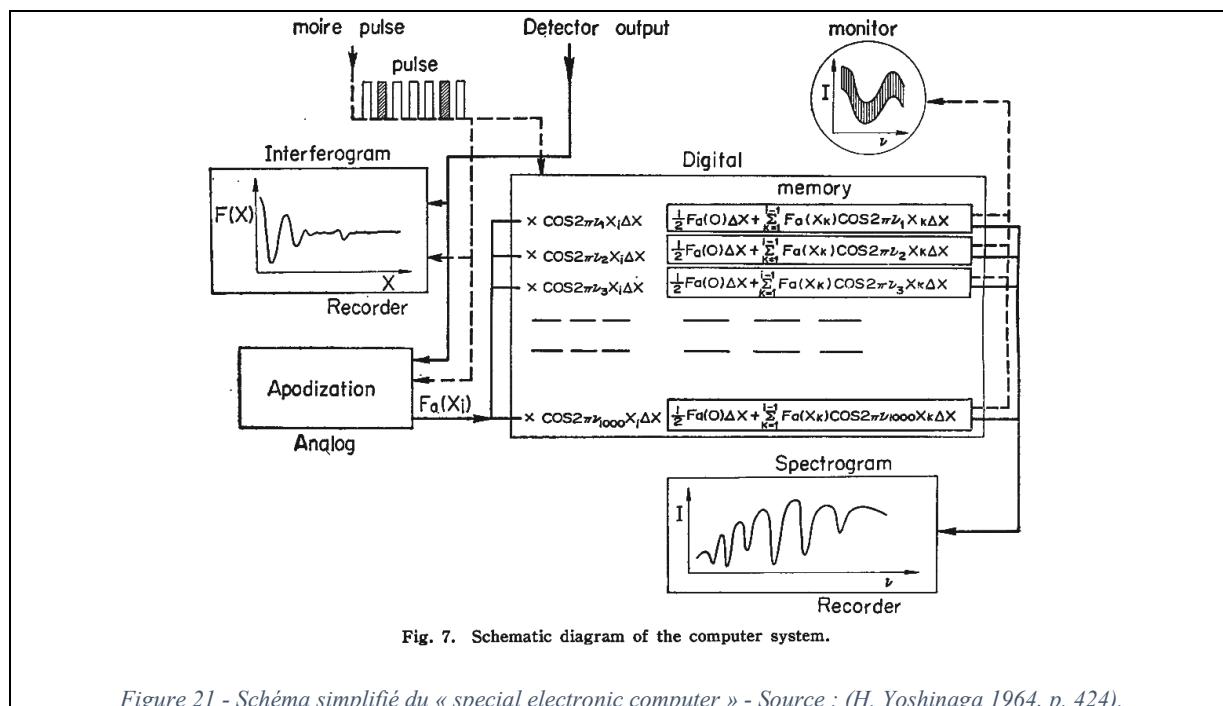
À titre très indicatif, néanmoins très significatif, un interféromètre Beckman-RIIC de type FS-720 est commercialisé à \$7550 sans électronique de contrôle ou de calcul, en 1970. La combinaison FS-720 et FTC-300 qui automatise et calcule le spectre est chiffrée à \$38550. Très approximativement l'électronique représente donc 4 fois le prix de l'interféromètre.

d) Special electronic computer – Université d'Osaka -1964-66

Le groupe du département Applied Physics de l'Université d'Osaka a conçu et fabriqué un ensemble instrumental complet vers 1964, pour la FTS dans l'infra-rouge lointain. Sans avoir tous les détails de l'instrument, il est manifeste qu'il hybride analogique et numérique, sur deux fonctions principales de l'ordinateur : l'apodisation est réalisée par un système analogique, le calcul de la transformée est assuré par un système numérique (Figure 21 et Figure 22). Le nombre de points enregistrés est peu élevé (1000 points) et la précision reste faible par choix de conception. En revanche l'instrument est conçu pour calculer le spectre en direct : le

¹⁴¹ (Bell 1972, p. 272; Low 1970).

détecteur de l'interféromètre est directement relié à l'ordinateur pour faire un calcul au fur et à mesure.



e) *Digilab FTS-14 – vers 1969*

Le premier ensemble complet commercialisé avec un système de calcul entièrement numérique est le Digilab FTS-14¹⁴². Digilab est une filiale de Block Engineering, qui produit des spectromètres, notamment pour la NASA. Dans le FTS-14, la partie optique est un interféromètre Block Model 296. Le convertisseur analogique-numérique qui digitalise le signal génère une sortie en 14 bits, ce qui a posé une contrainte importante dans le choix de l'artefact informatique adjoint. La contrainte s'ajoute au nécessaire compromis à faire entre coût et performance de calcul. Le mini-ordinateur DEC PDP-8, blockbuster de l'époque, est le plus économique mais fonctionne en 12 bits, il est donc inadapté à l'instrument. Pour le prototype du FTS-14, l'équipe de conception opte initialement pour un autre mini-ordinateur, le Varian 620i fonctionnant en 18 bits. Or en 1968 une équipe de DEC part fonder une entreprise, Data General, qui conçoit et commercialise le Nova, un mini-ordinateur en 16bits (les débouchés en 16 bits s'avèrent importants). Digilab choisira finalement un couplage avec le Nova pour sa ligne commerciale ouverte avec le FTS-14 en 1969, et devient le premier client OEM de Data General¹⁴³.

Le choix de l'algorithme de calcul, en 1969, ne se discute guère : ce sera une FFT, devenue un standard, programmée dans tous les langages et systèmes informatiques. Il restera néanmoins la problématique de la mémoire et du stockage : certes l'algorithme de FFT est remarquable, il permet de réduire les temps de calcul drastiquement, mais il faut des données précises et de la mémoire pour les stocker. Comme chez Beckman-RIIC, le coût informatique est très élevé, à une heure où l'utilisation du moindre octet de mémoire doit être optimisé. Or une fois les logiciels d'acquisition et de traitement en mémoire, il reste une portion très restreinte pour le stockage des données.

Digilab est contraint à l'inventivité pour minimiser la taille des interférogrammes et des spectres dans les mémoires du système¹⁴⁴. En outre le calcul par FFT se fait en simple précision : la double précision sera accessible deux ans plus tard seulement. Le Nova réalise toutes les opérations et traitements mathématiques sur l'interférogramme : pré-traitement du signal, apodisation, correction de phase, calcul de FFT, affichage des résultats, sélection des pics. Il sert également à suivre le déroulement de la mesure mais il ne contrôle pas à proprement parler l'instrument : l'automatisation complète se fera dans la génération suivante, sur une base micro-informatique.

Quelques mois après le FTS-14, le concurrent Nicolet sort le spectromètre FTIR Model 7199 : il est plus grand, plus précis. Sur le fond ces deux instruments vont fixer beaucoup de standard de la FTIR pour plusieurs années et assurer la popularité grandissante de la FTIR dans

¹⁴² Des détails dans : (Griffiths 2017). Il est en outre le premier modèle commercial de type « rapid-scanning » (invention de L. Mertz).

¹⁴³ On signalera, petit détour de l'histoire, que Varian a racheté Digilab, ses filiales et son expertise dans l'instrumentation FTIR en 2004.

¹⁴⁴ (Griffiths 2017, p. 336-338) détaille quelques-uns des compromis : « Infrared interferograms were sampled at zero crossings of the sinusoidal laser interferogram and stored in single precision [...]. To keep the number of data points to a minimum, the sampling interval was twice the wavelength of the helium-neon laser, which meant that the Nyquist frequency was 3950 cm⁻¹. Even so, data storage was at a premium. A maximum of three 0.5 cm⁻¹, or twelve 2 cm⁻¹, resolution spectra could be saved. Users had to be careful not to overwrite previously measured spectra. No resolutions other than 0.5 or 2 cm⁻¹ were permitted on the early instruments. Spectra were output on preprinted chart paper with no alphanumerics. There was no space for spectral processing: even spectral subtraction was implemented at least one year after the first instrument was delivered. »

le monde académique et industriel. Ainsi s'engage à partir de 1970 une ère de développement industriel des spectromètres FTIR, et la compétition entre quelques constructeurs.

La conception du FTS-14 illustre toute la problématique d'une instrumentation en cours d'évolution vers le numérique, mais dont les succès ultérieurs et les performances théoriques ont fait oublier le coût, et les développements spécifiques¹⁴⁵. En 1968-69 l'instrumentation est très dépendante de l'industrie des mini-ordinateurs, ce qui ne se démentira pas dans les autres exemples à venir d'une instrumentation en phase de « numérisation ». Varian, DEC, Data General sont, aux côtés de HP, IBM, les fournisseurs de la partie informatique de l'instrument¹⁴⁶. Ce sont des artefacts d'usage très générique, des mini-ordinateurs, qu'il faut à grand prix adapter à l'instrumentation FTIR. En outre les systèmes d'entrée/sortie, les systèmes de commande (dont ceux pour saisir les instructions), de contrôle et de visualisation des résultats sont très déterminés par l'informatique : le FTS-14 est piloté par un télétype très répandu, le modèle ASR-33, avec lecteur et perforateur de bandes.

3. La question de l'échantillonnage et de la conversion analogique-numérique

Dans tous les systèmes hybrides évoqués précédemment, et dès lors que le calcul de la transformée de Fourier est réalisé numériquement, le dispositif de conversion du signal analogique enregistré vers le numérique est crucial. Dans son principe, la conversion est une opération mathématique transformant un signal continu en un flux de valeurs numériques binaires la plupart du temps, donc sous forme de 0 et 1. C'est un point qui dépasse largement le seul sujet de la FTS puisque tous les instruments dont une partie est numérique requièrent ces dispositifs. L'enjeu de la conversion peut se résumer ainsi : comment ne pas « perdre » d'information dans la conversion ? Autrement dit comment s'assurer que le signal numérique est équivalent en terme informationnel au signal continu ? Toute réponse à cette question à partir de 1950 est encadrée par les théories de l'information de Shannon et Wiener.

Pour ce qui touche à la FTS, les spectroscopistes (J. Connes tout particulièrement dans ses travaux pionniers) se sont penchés très tôt sur l'opération, d'un point de vue théorique et pratique. Leur approche en termes d'information, d'optimisation du rapport signal sur bruit, fait écho à leur lecture de la « théorie mathématique de la communication » de Shannon. Le théorème de Shannon cadre dans son principe l'opération d'échantillonnage : si, dans la décomposition de Fourier d'un signal, la fréquence maximale est $f_{\max}$, l'échantillonnage doit se faire à une fréquence au moins double $2f_{\max}$ pour ne pas perdre d'information. La fréquence ne doit pas trop dépasser cette limite sous peine d'introduire un « repliement de spectre » (folding ou aliasing) en ajoutant artificiellement des composantes spectrales qui se mélangeraient avec les composantes mesurées initialement, sans possibilité de les dissocier.

Ce point de principe a une conséquence très directe dans la pratique : puisque les fréquences en infra-rouge proche sont plus élevées qu'en infra-rouge lointain, la cadence

¹⁴⁵ A titre indicatif et approximatif, le FTS-14 est commercialisé autour de \$20 000 en 1970, et le mini-ordinateur Nova coûte \$8 000.

¹⁴⁶ Par exemple (Johnston 1991, p. 130-132) mentionne un autre dispositif, le Model 2000 fabriqué par CODERG (Société de Conversion des Energies – Clichy) : celui-ci est doté d'un Varian 620i, calculant la transformée de Fourier de manière incrémentale, au fur et à mesure de la mesure de l'interférogramme, avec projection du résultat sur oscilloscope.

d'échantillonnage doit donc être plus élevée. Le dispositif doit enregistrer à cadence très rapide et génère encore plus de données par unité de temps.

La seconde étape de la conversion en numérique est la quantification des valeurs échantillonnées. En binaire, cette opération est déterminée par la longueur du mot choisi, donné en bits : 8 bits, 12 bits, 16 bits, etc. Une conversion en 8 bits fixe $2^8 = 256$ valeurs possibles. Plus le mot est long, plus la quantification peut être précise ; moins il est long, plus l'opération va introduire du bruit et des approximations dans le signal. La mise en œuvre intègre ces grands principes et la pratique impose alors différents compromis entre deux paramètres : la vitesse et la précision de la conversion. La vitesse est la cadence d'échantillonnage, qui dans les années 1960 peut atteindre des centaines de Khz : cette vitesse doit être rapportée à la gamme de fréquences infra-rouge visées. La précision, ou la résolution, est fixée par le nombre de bits de la quantification. Il est possible théoriquement de convertir vite et précisément mais cela suppose en pratique une mémoire informatique adéquate. Ce qui est précisément un obstacle technologique jusque dans les années 1980, pour la FTS comme pour toutes les machines informatiques autres que les très grands systèmes.

Dans la pratique le compromis est trouvé à l'articulation entre le bruit produit par la conversion en numérique et celui inhérent à la mesure interférométrique, de manière à altérer (mathématiquement) le moins possible le rapport signal sur bruit de l'instrument.

4. Une résistance aux systèmes numériques ?

Si la décennie s'achève en 1970 avec une FTS à base informatique élargie, il reste des espaces de conception à explorer en matière de calcul de transformée de Fourier. En 1974 C. Velzel, chercheur au Philips Research Laboratories à Eindhoven (Pays-Bas), publie un rapport de recherche intitulé : « Fourier spectroscopy without a computer ». Il est orienté sur les solutions optiques analogiques susceptibles de déterminer le spectre à partir de l'interférogramme, en rupture affichée avec l'ordinateur et la solution FFT, dont la flexibilité et les performances ne sont évidemment pas niées. Velzel est un jeune entrant dans le domaine, formé à la technique-physique, il fait carrière au sein de Philips depuis 1965 et obtient son PhD sur la FTS en 1974, à l'Université d'Utrecht. Sa trajectoire scientifique le conduit dans les projets aussi bien en holographie, spectroscopie que sur les lasers à base de semi-conducteurs, c'est-à-dire autant de projets à visée industrielle pour Philips et sa branche dédiée à la fabrication d'instruments scientifiques.

Au début des années 1970, il explore une méthode baptisée « Inverse Fourier spectroscopy », qui repose sur l'idée suivante : un interféromètre, tel qu'il est utilisé en FTS, est configuré pour calculer une transformée de Fourier. En l'occurrence il calcule analogiquement un interférogramme à partir d'un spectre. Velzel étudie la possibilité d'utiliser l'interféromètre pour faire l'opération inverse : c'est-à-dire utiliser le même artefact de base, mais configuré autrement, pour réaliser un instrument de calcul de Fourier.

En mode FTS directe, le détecteur en sortie de l'interféromètre intègre sur un large domaine de longueurs d'onde : on mesure les variations sur le détecteur en fonction de la différence de marche entre les branches (position du miroir mobile – voir Figure 23). Pour réaliser l'opération inverse la source qui génère le flux dans l'interféromètre doit avoir un spectre étendu de longueurs d'onde : ce flux est ensuite modulé par l'interférogramme à

analyser. Le signal de sortie, s'il est intégré par rapport au temps et non plus par rapport à la position du miroir, fournit le spectre cherché.

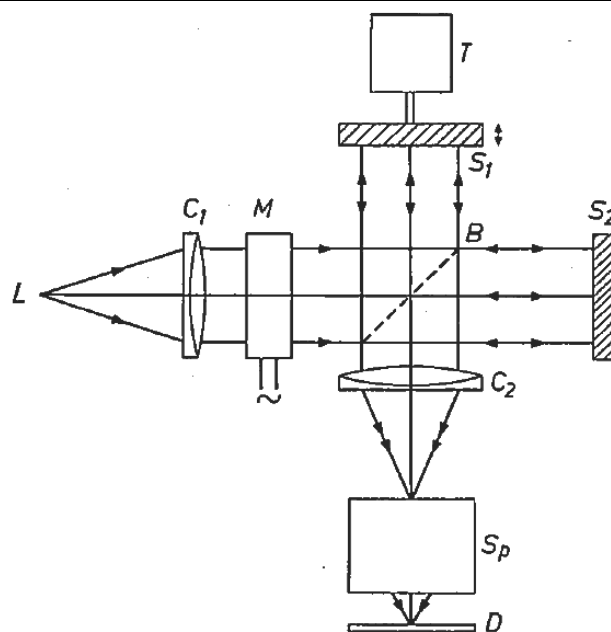


Figure 23 - Schéma de principe de Velzel – Source : (Velzel 1972, p. 298).

L = source lumineuse à spectre continu (lampe à incandescence)

M = modulation du flux d'entrée

Sp = spectrographe qui sépare les composantes spectrales du flux de sortie de l'interféromètre

D = détecteur qui intègre dans le temps (typiquement une plaque photographique)

Velzel explore la voie d'une spectroscopie « sans ordinateur », c'est-à-dire uniquement à base d'artefacts matériels pour l'optique. La méthode inverse se range dans la catégorie des méthodes dites synthétiques : l'interférogramme, dont on veut déterminer la transformée de Fourier, sert de système de pondération pour faire des superpositions de franges harmoniques. Dans les méthodes dites analytiques, l'interférogramme est converti en une transparence optique dont on analyse le spectre des fréquences spatiales. Dans les méthodes indirectes, le signal recueilli à la sortie de l'interféromètre est un signal électrique, transformé par différents moyens en un masque optique comme dans l'« Optical analogue Fourier transformer » d'Edgar, Lawrenson et Ring¹⁴⁷. La spectroscopie de Fourier « holographique » constitue une alternative plus directe parmi les méthodes analytiques : l'enregistrement est fait directement sur plaque photographique à partir d'un montage adapté aux interféromètres. Ajoutons que Velzel n'est pas un chercheur isolé sur ce terrain. Plusieurs physiciens, spécialistes de l'optique, explorent les applications et utilisations possibles de l'holographie, autour de G.W. Stroke (University of Michigan)¹⁴⁸. Il reste que ce sont des projets instrumentaux sans suite industrielle connue, qui interrogent plus largement sur les chemins pris par le domaine de l'optique de Fourier en plein

¹⁴⁷ Voir page 97.

¹⁴⁸ Incluant plusieurs collaborateurs : R. Restrict, D.G. Falconer, D. Brumm. Les principaux travaux sont publiés dans (George W. Stroke 1967; G. W. Stroke, Brumm et Funkhouser 1965; G. W. Stroke et al. 1965; G. W. Stroke et Funkhouser 1965).

développement dans les années 1970 et sur les tentatives qu'on pourrait découvrir chez d'autres constructeurs.

5. Vers un instrument standardisé

Aux tâtonnements pour faire la preuve expérimentale du bienfondé de la FTS succède la commercialisation des tout premiers instruments de FTS dans les années 1960, animée par plusieurs constructeurs enthousiastes. Dans les années 1970, l'instrument devient toujours plus populaire parmi les physiciens, et de plus en plus de chimistes qui deviendront le premier marché de la FTIR dans les années 1980¹⁴⁹. Toute la conception est orientée pour aller au plus vite dans le traitement numérique du signal. À l'image des modules FTC-100 et du FTS-14 de Digilab, cela va de pair avec une dissociation progressive, dans la conception, entre les parties interférométriques et informatiques, sur des bases artéfactuelles qui sont stabilisées et en voie de standardisation. Ce mode de conception est scellé par un ensemble de raisons qui inclut à la fois les faiblesses de l'analogique, en termes de précision surtout, la rapidité croissante de l'électronique numérique avec les algorithmes, et des facteurs qui tiennent à l'économie de la production de ces instruments et aux politiques industrielles orientées vers l'électronique numérique. Nous aurons l'occasion d'y revenir dans la partie consacrée aux transformations des années 1970. Dans ces mêmes années, par ailleurs, avec l'arrivée sur le marché du microprocesseur, les instruments sont de plus en plus automatisés, contrôlés informatiquement et miniaturisés. Des processeurs sont spécialisés pour les traitements informatiques, les instruments gagnent en précision et en rapidité : le « temps réel » espéré au tournant de 1970 devient concret.

La micro-informatique amplifie la dynamique, la puissance et la rapidité de calcul ne cessent d'augmenter. Les instruments sont automatisés, leur usage est facilité par des interfaces ergonomiques. Le rapport de l'utilisateur à l'instrument change : plus besoin d'être un physicien spécialiste de spectroscopie pour utiliser l'instrument, tout technicien de laboratoire peut s'approprier l'utilisation avec une formation adéquate.

La standardisation sur le plan matériel et logiciel, généralise un usage lui aussi standardisé. Les développements se poursuivent dans une perspective qui est toujours celle de l'asservissement aux technologies numériques, en particulier sur le système de détection et le dispositif de pilotage du miroir mobile. De plus en plus de parties de l'instrument doivent être reliées au système de traitement numérique, de manière fiable, rapide, efficace. Les technologies numériques, et en l'occurrence informatiques, prescrivent le mode de conception de l'instrument et pilotent le processus de mesure avec l'instrument.

La gamme d'utilisation s'élargit en même temps que son utilisation se simplifie. Le spectroscope FTIR est devenu un instrument d'analyse standard, qu'on trouve sur toutes les paillasses du monde entier. Reste à comparer cette trajectoire d'instrumentation à d'autres histoires pour déterminer la typicité au-delà des spécificités de la chronologie de ce développement.

F. Le spectroscope FTIR, un instrument de Fourier

Ce premier parcours historiographique dans la FTIR illustre notre objectif d'examiner à nouveaux frais l'histoire de l'instrumentation scientifique, par le filtre des savoirs

¹⁴⁹ (Johnston 1991).

mathématiques : l'exemple nous éclaire sur les divers rôles joués par les mathématiques dans l'instrumentation, les multiples fonctions épistémiques qu'elles assurent dans l'instrument.

En premier lieu, les mathématiques ont permis d'élaborer une théorie du fonctionnement et une modélisation rigoureuse des instruments. Les travaux de Janine Connes en sont un jalon important. Au cœur de la FTIR se trouve une autocorrélation de deux signaux produite par l'interféromètre de Michelson, artefact matériel essentiel de l'instrument. Dans son principe, l'instrument fait opérer cet interféromètre pour obtenir la transformée de Fourier du spectre de la source ou de l'échantillon analysé. Dans les esprits, la partie interférométrique du spectroscope FTIR fonctionne comme un calculateur analogique de transformée de Fourier. Il faut inverser la transformée de Fourier pour obtenir le spectre et trouver des ressorts mathématiques pour remédier à l'impossibilité de changer la nature et la matérialité du module interférométrique.

En découle un ensemble de savoirs décisifs et créés pour l'occasion, concernant les filtrages et les moyens d'apodisation, les méthodes de correction de phase, les calculs effectifs des transformées de Fourier de signaux enregistrés et la mise en œuvre d'algorithmes nouveaux de FFT dès 1966. Il y a évidemment une part de réutilisation de savoirs déjà constitués, mais nous avons voulu insister sur l'élaboration de savoirs spécifiques. Ces travaux mathématiques sont le fait de praticiens des mathématiques, qui sont d'abord des physiciens et se définissent comme tels.

La création d'instruments de calcul (analogique et numérique), sur mesure, est une sorte de pendant très matériel aux méthodes mathématiques. Et même si la FTIR se développe sur le succès de la combinaison de l'électronique numérique et de la FFT, il est impensable de réduire le processus d'instrumentation à une miraculeuse implémentation de FFT. Le processus est fait de compromis successifs dans lesquels interviennent plusieurs paramètres mais toujours polarisés par les modes d'usage des instruments : à la spécificité des solutions analogiques, répondront la généricité et la souplesse des solutions numériques, et la vitesse d'opération n'est qu'un paramètre parmi d'autres.

On peut encore voir cette histoire du développement de la FTIR comme une grande inversion du rapport au calcul numérique. Calculer était le principal obstacle dans les années 1960, les calculs numériques étaient lents, chers, peu accessibles et rendaient la FTIR difficile à vendre face aux instruments dispersifs. Mais le fait de pouvoir traiter toutes les données numériquement devient un avantage quand l'électronique et l'informatique sont suffisamment performantes pour offrir du « temps réel ». La FTIR est moins contrainte que les instruments dispersifs et tire parti de tous les principes de la FTS : luminosité, multiplexe, avantage de Connes avec la précision sur les longueurs d'onde. D'un bout à l'autre le processus d'instrumentation passe par une hybridation progressive avec l'ordinateur, jusqu'à la maximisation des technologies numériques mais qui ne peuvent s'affranchir de l'artefact interféromètre et de son mode d'usage analogique.

Nous n'avons pu faire pour le moment qu'un survol des lieux et des acteurs de cette histoire. Approfondir la biographie des protagonistes qui ont été en première ligne durant la période pionnière de cette instrumentation, analyser les développements collectifs, à l'échelle des laboratoires et dans les moments de rassemblement de la communauté, comme les colloques

importants de cette histoire, permettra de comprendre les jeux des savoirs et des instruments, à l'échelle locale et plus globale. Il sera possible de préciser les enjeux et points controversés d'une histoire qui n'a rien d'un long fleuve tranquille. On a vu que la FTIR s'impose « contre » une spectroscopie installée et que les savoirs mathématiques très importants embarqués dans la FTIR représentent une charge épistémologique et très symbolique en sa (dé)faveur. Ces mathématiques sont en outre encapsulées à différents niveaux dans les instruments. Et même si cela ne modifie pas les concepts fondamentaux de l'analyse de Fourier, d'un point de vue qui serait strictement mathématique, la FTIR ouvre un pan calculatoire de la transformation de Fourier qui n'avait que peu de place auparavant.

Par ailleurs les principes de la spectroscopie par transformée de Fourier ne sont pas limités au domaine de l'infra-rouge. Historiquement la FTIR a été première. Mais les principes une fois acquis et les performances de la FTIR attestées, la FTS a été étendue à d'autres domaines : en résonance magnétique nucléaire (Fourier transform nuclear magnetic resonance spectrometry - FTNMR) et en spectrométrie de masse (Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry » FTICR). Vers 1970 les principes de la FTS sont « prêts », robustes, ce qui accélère leur adoption dans les autres domaines. Les principes des instruments de Fourier et les savoirs mathématiques afférents circulent au-delà de la FTIR, mais avec le support nouveau des artefacts déjà conçus pour la FTIR. Les savoirs encapsulés dans ces artefacts, selon le terme de Baird, deviennent nomades. Il reste à analyser les modes d'adoption, d'adaptation de ces principes, avec leurs chronologies propres pour comprendre les débats et évolutions du rapport à l'analyse de Fourier tels qu'ils se sont développés dans ces nouveaux domaines. L'adaptation des savoirs mathématiques exige probablement que les concepteurs de nouvelles instrumentations soient équipés mathématiquement : penser qu'ils sont nomades et qu'ils peuvent être transparents pour les utilisateurs à force d'être encapsulés, ne peut pas rendre compte de ces processus de transposition et d'adaptation. Chaque nouvelle instrumentation fournira matière à comparaison.

Au-delà des spectroscopies, au fil de l'histoire de la FTIR et en anticipant sur ce qui suit, nous avons déjà pointé plusieurs types d'interactions ou de passerelles avec d'autres domaines, articulés autour de savoirs mathématiques :

- Le traitement du signal et de l'information qui consiste à la fois en un prétraitement du signal et en la recherche d'une amélioration du rapport signal sur bruit. Ce traitement est cadré par les théories mathématiques de l'information de Shannon et Wiener.
- Le calcul de la transformée de Fourier est aussi un aspect essentiel dans le domaine de l'optique de Fourier et l'holographie.
- Le calcul de sommes et séries de Fourier réutilise des instruments de calcul issus de la cristallographie et implique jusqu'aux projets informatiques émergents comme l'ordinateur EDSAC de Cambridge.
- La FFT a été développée simultanément dans plusieurs domaines et diffuse très rapidement avec des implémentations logicielles spécifiques à chaque instrument.

Ajoutons que les matérialités électroniques et informatiques conditionnent en grande partie l'intégration des fonctions mathématiques, offrant opportunités de développement et contraintes. D'une part la mini-informatique, comme l'ordinateur Nova de Data General, sert très clairement de moteur à l'intégration, la miniaturisation en quelque sorte, l'encapsulation et la diffusion de la FFT en FTIR. D'autre part la mémoire des ordinateurs est restée pendant des

années une contrainte forte pour le développement instrumental obligeant à trouver des solutions alternatives en termes mathématiques et algorithmiques. Enfin la micro-informatique, avec les PCs des années 1970-80 évidemment, amène des technologies très génériques pour l'instrumentation : elles assurent tout à la fois les calculs de Fourier, le traitement de l'information, la commande et l'automatisation des instruments.

Chacune de ces interactions et passerelles devrait faire l'objet d'une analyse approfondie pour indiquer les transformations très générales de l'instrumentation en rapport avec les savoirs mathématiques. Nous en proposerons des esquisses dans les pages qui vont suivre. Le premier point de comparaison et d'analyse de la circulation de ces savoirs concerne le processus d'élaboration de la cristallographie par diffraction de rayons X.

III. La cristallographie par diffraction de rayons X et les « synthèses de Fourier » (1929-1960)

Utiliser les rayons X comme moyen d'investigation de la matière est pratiquement concomitant de leur découverte à la fin du 19^{ème} siècle. Les années 1910 ont vu le développement de l'analyse des structures cristallines, par le phénomène de diffraction des rayons X, découvert par Max von Laue (1879-1960) en Allemagne. William Henry Bragg (1862-1942) et son fils William Lawrence Bragg (1890-1971) en Angleterre sont considérés comme les véritables pionniers des recherches visant à faire de ce phénomène de diffraction un véritable instrument d'analyse des cristaux par rayons X¹⁵⁰. Dès 1915, ce processus d'instrumentation est structuré par une analogie entre le phénomène de diffraction et les procédés de l'analyse de Fourier. C'est une évolution majeure de la cristallographie, science déjà ancienne¹⁵¹ et développée tout au long du 19^{ème} siècle, mais qui ne rentre dans l'intimité atomique des structures qu'avec les rayons X.

Les techniques et instruments de la cristallographie par diffraction de rayons X n'ont pas fait l'objet, jusqu'à aujourd'hui, d'une analyse historique et épistémologique approfondie. Symptômes d'une histoire marquée par des figures emblématiques, des prix Nobel, dont certains médiatisés pour de bonnes ou de mauvaises raisons, l'historiographie repose sur quelques anniversaires, des récits d'acteurs et des biographies des Bragg¹⁵², de Dorothy Hodgkin (née Crowfoot, 1910-1994) notamment. Néanmoins un domaine a été particulièrement approfondi par les historiens, celui de l'interface avec la biologie moléculaire émergente, liée aux découvertes sur la structure des protéines et de l'ADN. Cela inclut des biographies des principaux protagonistes : Rosalind Franklin (1920-1958), Francis Watson (1916-2004) et James Crick (né en 1928)¹⁵³. Mais l'historiographie n'a que ponctuellement considéré les pratiques, les cultures matérielles et l'instrumentation elle-même comme sujet.

Des premières expériences des Bragg aux diffractomètres automatisés des années 1970, le développement instrumental est un très long cheminement cherchant à améliorer les sources de rayons X, à perfectionner les systèmes de mesure et d'enregistrement, à élaborer des modes de préparation des cristaux et des moyens d'interprétation des résultats. Les savoirs et savoir-faire accumulés sur les 50 premières années de cette instrumentation cristallographique sont monumentaux. Dans ce mémoire nous nous focaliserons sur les savoirs mathématiques développés et mis en jeu dans la conception de l'instrument et dans l'interprétation des résultats expérimentaux. Dans les rapprochements et la comparaison avec l'exemple de la spectroscopie par transformée de Fourier, on trouvera les traits communs et ceux distinctifs de chaque processus d'instrumentation, incluant le rôle épistémique des mathématiques. Les passerelles entre ces deux instrumentations de Fourier existent et les savoirs mathématiques sont décisifs

¹⁵⁰ Von Laue obtient le Prix Nobel de physique en 1914, les Bragg celui de 1915.

¹⁵¹ La cristallographie s'est développée sur des considérations géométriques et de symétrie des cristaux, en rapport direct avec les mathématiques donc, impliquant la curiosité des naturalistes depuis des siècles. Elle est devenue une science et une technique très importante à la faveur de la révolution industrielle et de l'exploitation minière au 19^{ème} siècle. Auguste Bravais (1811-1863), physicien et mathématicien, a par exemple introduit la notion de réseau réciproque, utile aux cristallographes jusqu'à aujourd'hui. (Reynaud 1991; Maitte 2014; Pénicaud 2018).

¹⁵² (Hunter 2004; Jenkins 2008).

¹⁵³ (Chadarevian 2002; Ridley 2006).

sur ce plan-là. C'est ce qui alimentera nos réflexions sur la variété des rapports entre instrumentation et savoirs mathématiques.

Nous allons prioritairement analyser le développement de la cristallographie dans les décennies 1930-1950, période durant laquelle s'échafaude cette instrumentation de Fourier, très robuste dans ses principes. Au sortir de la seconde guerre mondiale son développement est spectaculaire, comme l'illustre l'épisode de découverte de la structure de l'ADN au début des années 1950, grâce aux clichés de diffraction et leur interprétation. Dans les années 1960, la cristallographie a déjà un socle d'acquis et de méthodes solides quand la FFT entre en jeu. Si son adoption est irrémédiable, elle n'est pas aussi fulgurante que dans d'autres domaines : son importance est acquise au milieu des années 1970, l'algorithme de FFT transforme l'horizon mais ne « résout » pas immédiatement toutes les difficultés instrumentales. Il apparaîtra ainsi que la chronologie et les modes d'appréhension des analyses de Fourier sont différentes de la spectroscopie.

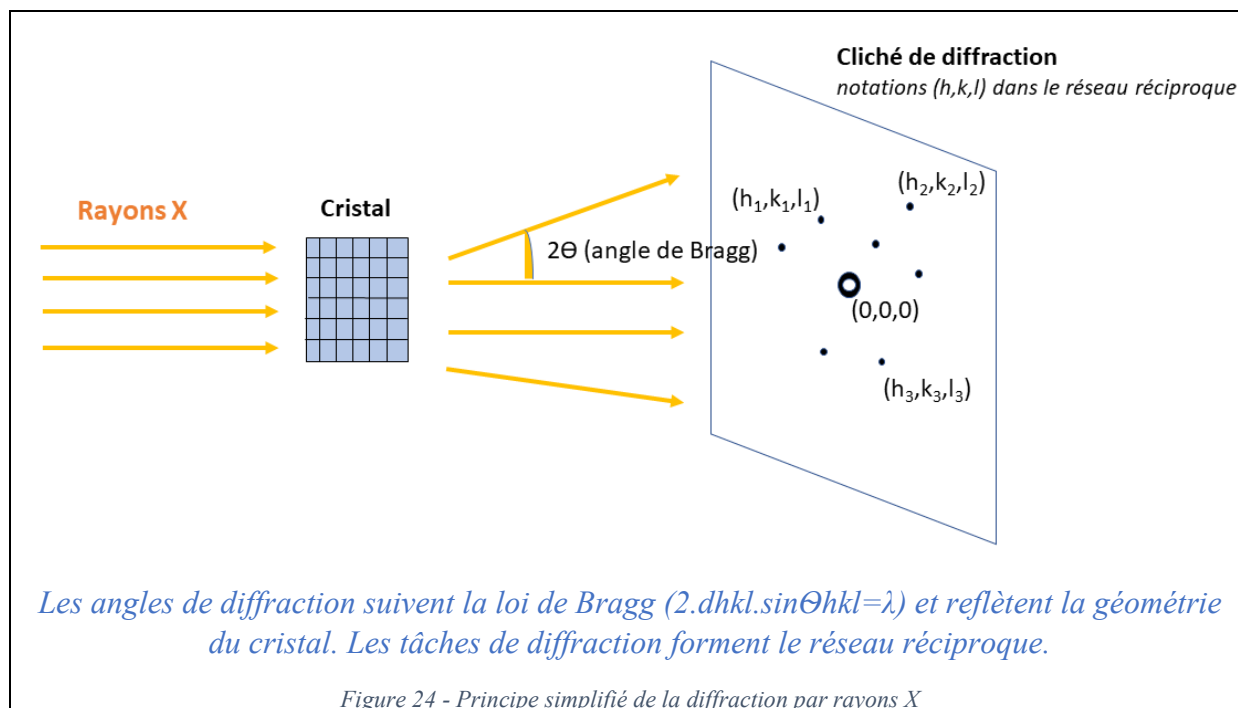
A. La « méthode des séries de Fourier »

1. William Henry Bragg et l'interprétation de la diffraction comme processus de Fourier

L'idée de recourir aux séries de Fourier dans l'interprétation des résultats de la diffraction des rayons X par des cristaux est émise par W.H. Bragg dès 1915. Son principe est décrit dans sa *Bakerian Lecture* de 1915, intitulée « X-rays and Crystal structure » :

*If we know the nature of the periodic variation of the density of the medium we can analyse it by Fourier's method into a series of harmonic terms. The medium may be looked on as compounded of a series of harmonic media, each of which will give the medium the power of reflecting at one angle. The series of spectra which we obtain for any given set of crystal planes may be considered as indicating the existence of separate harmonic terms.*¹⁵⁴

¹⁵⁴ (W. H. Bragg 1915, p. 270).



Dans un cristal les électrons sont plus ou moins densément répartis : présents au maximum autour des noyaux atomiques (densité maximale) et quasiment absents des espaces interatomiques (densité quasiment nulle). Cette distribution, prise au sens d'une fonction mathématique classique, est périodique dans les trois dimensions d'espace, le cristal étant la répétition d'une cellule (maille) élémentaire. La distribution est décomposable en séries de Fourier (spatiales) de termes harmoniques – c'est un résultat bien connu des physiciens, même si les conditions mathématiques de cette décomposition et les théorèmes mathématiques correspondants ne les intéressent pas à coup sûr. Ces savoirs élémentaires de l'analyse de Fourier, ce que Lord Kelvin et Lord Rayleigh ont rangé sous le terme de « Fourier's theorem »¹⁵⁵ est l'instrument de conception de cette nouvelle cristallographie.

Bragg développe une analogie avec la diffraction par rayons X d'un cristal qui est pensée, dans son principe même, comme un processus de Fourier. Chaque composante harmonique de la distribution d'électrons réfléchit les rayons X selon un certain angle. Les résultats de la diffraction de faisceaux de rayons X sont des superpositions de ces harmoniques : les relevés sur les clichés de diffraction sont autant d'indicateurs de ces harmoniques et de la distribution des électrons dans les plans du cristal. Dans les termes des cristallographes, les composantes de Fourier de la densité électronique sont les « facteurs de structure » obtenus par les résultats des expériences de diffraction.

Tout cela signifie que le principe de décomposition en série de Fourier d'une fonction mathématique est le levier qui permet de conceptualiser le principe de la cristallographie par diffraction de rayons X – ce qui va se concrétiser dans la « méthode des séries de Fourier » de William Lawrence Bragg.

L'histoire de la cristallographie par rayons X de 1915 aux années 1960 est celle des tentatives, réussites et difficultés, de résolution du problème mathématico-physique de

¹⁵⁵ Nous évoquerons dans la partie IV quelques-uns des traités de références de cette époque, ceux de Lord Kelvin et Lord Rayleigh en particulier : (Kelvin et Tait 1867; Rayleigh 1877).

l'inversion de ce processus de Fourier. Le problème est différent de celui de la spectroscopie. Il est lié au mode d'enregistrement des résultats de la diffraction : ce sont des rayons X diffractés qui impriment une plaque photographique, laquelle n'est sensible qu'aux intensités des rayons et n'enregistre pas les phases du rayonnement diffracté. Le cliché ne contient qu'une information partielle, tronquée : le « facteur de structure » est un nombre complexe avec une amplitude et une phase – dans l'analogie de Bragg, ce sont les coefficients de Fourier de la série. Mais les clichés ne donnent que les « amplitudes de structure ». Plus globalement l'optique des rayons X est fondamentalement différente de l'optique dans le visible ou l'infrarouge, car il n'existe pas de « lentille » pour les rayons X : impossible de bénéficier directement de propriétés mathématico-optiques des lentilles pour reconstituer des images de cristaux, par exemple. Les artefacts sont de natures différentes, les instruments opèrent des fonctions différentes, avec un rapport singulier aux savoirs mathématiques. Le « problème des phases » est la difficulté pratique majeure du procédé et toute la cristallographie par rayons X se concentre sur ce problème : comment obtenir à partir du cliché, nécessairement sans les phases, le plus d'informations possibles sur une structure cristalline inconnue ?

2. La méthode des séries de Fourier doubles - 1929

En approfondissant les idées avancées par son père, W. L. Bragg élabore une méthode pour déterminer les structures cristallines, sur la base de la représentation harmonique. Le point culminant est l'article de 1929 « The Determination of Parameters in Crystal Structures by means of Fourier Series »¹⁵⁶ dans lequel il présente la « méthode des séries de Fourier doubles ». Chaque point du motif de diffraction enregistré sur une plaque photographique est interprété comme un terme d'une somme de Fourier. Les intensités mesurées sur les clichés sont les modules au carré des facteurs de structure. Pour chaque plan du cristal et angle d'incidence des rayons X, il est possible d'obtenir des projections de ces facteurs de structure F_{hkl} , repérés par les indices de Miller des plans notés hkl . La série double de Fourier dont les coefficients sont les facteurs F obtenus dans cette projection plane est la densité électronique elle-même projetée sur un plan. Les coefficients sont des facteurs F réduits à deux indices F_{hk} . En multipliant les enregistrements de projections sur des plans, il est possible de reconstituer la densité électronique, donc l'organisation atomique du cristal. L'instrument qui a permis les interprétations de W.H. Bragg en 1915, devient un moyen d'opérer l'analyse cristallographique.

En termes légèrement reformulés¹⁵⁷, Bragg indique qu'il est possible, sur la base de la mesure des facteurs F en projection sur un plan de diffraction donné, de retrouver la densité électronique ρ à partir des formules de Fourier, pour une surface S de la cellule élémentaire du cristal :

¹⁵⁶ (W. L. Bragg 1929a). Bragg s'appuie sur un ensemble de travaux préalables de William Duane (1872-1935), Robert Havighurst (1900-1991) et Arthur Compton (1892-1962) qui vont, en parallèle, élaborer des méthodes pratiques de calcul et considérer les séries triples, en trois dimensions. (Duane 1925; Havighurst 1925; Compton 1931).

¹⁵⁷ Dans (W. L. Bragg 1929a, p. 540), pour une projection sur la face repérée en cristallographie par les indices (100), une cellule élémentaire dont les longueurs des côtés sont a, b, c , faisant les angles α, β, γ entre eux, il introduit la série de cette manière :

$$\rho(y, z) = \frac{1}{bc \cdot \sin \alpha} \sum_{kl} F(Ok l) \cos \left[2\pi \left(\frac{ky}{b} + \frac{lz}{c} \right) \right]$$

$$\rho(x, y) = \frac{1}{S} \sum_{hk} F_{hk} \exp[-2i\pi(hx + ky)]$$

Puisqu'il n'est pas possible d'obtenir les phases directement sur les clichés de diffraction, les calculs se limitent aux termes de la série en cosinus. Ce n'est pas la seule approximation, puisque dans tous les cas il n'est pas possible de calculer une série infinie de termes, la série est donc tronquée arbitrairement. Et pour les évaluations pratiques, la densité n'est calculée qu'en quelques points (x, y) de la cellule élémentaire. En 1929 Bragg élabore sa méthode en étudiant une structure déjà connue et élucidée, la diopside, pour laquelle il reconstitue l'organisation cristalline avec les calculs de séries doubles. Bragg choisit les approximations suivantes : la cellule élémentaire est découpée en 24 parties, pour les abscisses x , et 12 parties pour les ordonnées y ; chaque série est évaluée sur ses 40 premiers termes pour les $24 \times 12 = 288$ points.

Jusqu'aux années 1930, la cristallographie par rayons X rassemble une petite communauté de physiciens : les jalons posés par les Bragg fixent un cap et une méthode suivis par l'ensemble de la génération de cristallographes qui rentrent dans les laboratoires¹⁵⁸. La méthode de Bragg est à l'image de l'évolution du travail des cristallographes des années 1920 jusque dans les années 1960, entre empirisme et ingéniosité mathématique. Les cristallographes procèdent par essais-erreurs pour tenter de déterminer la structure, de deviner les phases, et de déduire les paramètres des structures cristallines. C'est un processus itératif partant d'hypothèses sur la structure, la confrontation aux clichés de diffraction, et les interprétations de ces clichés après de longues séquences de calculs qui demandent une rapidité et une dextérité particulières. Dans les structures cristallines simples, avec une composition atomique limitée, les itérations sont rapides, et l'accès aux phases peut se faire par des astuces expérimentales. Pour les structures complexes, c'est impossible.

L'instrumentation de la cristallographie par rayons X est composite de multiples artefacts et opérations : la détermination des sources de rayons X, la préparation des cristaux, la définition des détecteurs, des systèmes de mesures d'angles de diffraction et elle embarque les mathématiques de Fourier depuis l'analogie interprétative proposée par W.H. Bragg jusqu'aux instruments qui permettent l'interprétation des résultats d'observation, par le calcul des séries doubles.

Avec ces premiers développements, les calculs de séries de Fourier à deux puis à trois dimensions deviennent partie intégrante du savoir-faire cristallographique. Mais c'est un problème inédit en termes d'analyse numérique¹⁵⁹ et de calculs à réaliser : la précision de la carte de densité électronique est liée au nombre de points où sont calculés les séries doubles, donc plus le cristallographe veut une carte précise, plus il a de calculs à faire. À titre indicatif, en 1935 la structure de la phtalocyanine requiert 270 000 opérations, en 1948 la méthémoglobine demande 420 millions d'opérations¹⁶⁰.

Personne n'avait un usage si intensif de longues séries de calculs au point d'imaginer des techniques et des machines, des instruments mathématiques, pour rendre ces calculs

¹⁵⁸ Voir par exemple les commentaires dans (Lipson et Beevers 1936).

¹⁵⁹ Les effets de troncatures des séries et leur influence sur la précision des résultats sont considérés très tôt par W.L. Bragg (W. L. Bragg et West 1930).

¹⁶⁰ La structure de la phtalocyanine est élucidée par J.M. Robertson (J. Monteath Robertson 1935) et la méthémoglobine par Max Perutz (Perutz 1949).

faisables en un temps raisonnable. On touche la partie la plus calculatoire et mathématique de l'instrumentation, qui rend possible l'interprétation des résultats jusqu'à leur terme.

Ces travaux sont animés par les cristallographes eux-mêmes, très peu de mathématiciens sont impliqués, au moins jusque dans les années 1950. Ils élaborent deux instruments mathématiques, de natures très différentes, qui sont devenus deux innovations essentielles des années 1930, avec une portée qui s'étend sur plusieurs décennies d'expériences cristallographiques : la fonction de Patterson et les bandes de Lipson-Beevers. Le calcul cristallographique (« Crystallographic computing ») prend son essor sur ces bases élargies, avant les inventions de systèmes de calcul nouveaux, certains spécifiques qui rappellent les solutions inventées pour la spectroscopie, d'autres génériques et dérivés des technologies informatiques, en construction après la seconde guerre mondiale.

B. La « fonction de Patterson », un instrument mathématique

En 1934 Arthur Lindo Patterson (1902-1966) montre que, malgré l'absence d'informations sur les phases, les distances interatomiques sont calculables à partir des clichés cristallographiques. Son procédé ne se substitue pas au calcul des paramètres de la structure, ni ne donne la carte de densité électronique directement : c'est un nouvel instrument mathématique à intégrer dans le processus itératif, qui passera à la postérité sous le nom de « fonction de Patterson ».

Arthur Patterson est un physicien (né en Nouvelle-Zélande) formé à l'Université McGill (Canada), collaborateur chez Bragg à la Royal Institution (1924-26), PhD à McGill en 1928, puis en séjour d'un an au Kaiser-Wilhelm-Institut à Berlin (auprès de M. von Laue), avant son installation aux États-Unis. Ses expériences multiples en font un expert de la cristallographie par rayons X lorsqu'en 1933, il part pour trois ans au MIT, invité par Bertram E. Warren et à la demande de Patterson, dans le département dirigé par John C. Slater. Moment décisif, car la question des transformées de Fourier, qui est déjà chez lui une « obsession »¹⁶¹, trouve un interlocuteur de premier plan en la personne du mathématicien Norbert Wiener : « I very soon learnt from him the fact that I had to work with the Faltung, but it took me more than a year to catch on to what it was all about »¹⁶².

L'idée de Patterson en 1934 est d'introduire une « série de F^2 » construite avec les facteurs de structure élevés au carré et les phases annulées, il ne reste donc que la partie en cosinus :

$$P(u, v, w) = \frac{1}{V} \sum_{hkl} |F_{hkl}|^2 \cos[2\pi(hu + kv + lw)]$$

partant toujours de la densité ρ exprimée en une série de Fourier :

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{V} \sum_{hkl} F_{hkl} \exp[-2i\pi(hx + ky + lz)]$$

L'interprétation de cette série repose sur les propriétés de la convolution (ici une auto-convolution) laquelle n'est que très peu connue même des mathématiciens à cette époque et

¹⁶¹ Dans sa courte autobiographie scientifique (Patterson 1962, p. 618)

¹⁶² (*Ibid.*, p. 620). La compréhension des enjeux liés à la « Faltung » a en fait pris un détour, puisque Patterson s'est intéressé à l'étude des liquides par rayons X, avant d'en revenir aux cristaux.

s'appelle alors « Faltung » dans le vocabulaire scientifique. Le meilleur spécialiste du sujet est Wiener, qui l'a introduite dans ses propres études sur les transformations de Fourier. Il est possible de calculer la « Faltung » d'une fonction de densité ρ selon la formule :

$$A(u) = \int \rho(x) \cdot \rho(x + u) \cdot dx$$

En d'autres termes, la fonction de Patterson n'est autre que la Faltung de la densité électronique, exprimée avec les coefficients de structure F . La carte de Patterson étendue à trois dimensions $P(u,v,w)$ représente les vecteurs entre atomes, pondérés par le nombre d'électrons de chaque atome. Patterson publie la formulation de la « série de F^2 » et son interprétation en 1934, avec ses aspects mathématiques et en ayant calculé deux structures simples avec cette « série de F^2 » que la communauté des cristallographes s'empressera d'appeler « série de Patterson » ou « fonction de Patterson ».

Il s'agit bien d'un instrument mathématique : il repose sur le formalisme de l'analyse de Fourier qui constitue l'artefact de cet instrument, incorporant des résultats encore confidentiels dans leur diffusion et qui sont utilisés sous forme d'une série introduite à dessein pour apporter une connaissance nouvelle sur les structures cristallines étudiées. La fonction épistémique de cet instrument est inédite. Elle s'avère capitale dans une situation de pénurie épistémique qui est celle du problème des phases. Ce n'est pas qu'un détour mathématico-instrumental ingénieux, et son usage sera extrêmement étendu pendant les décennies qui suivent.

Les cartes de Patterson sont faciles à interpréter quand le nombre d'atomes est réduit, mais la difficulté est exponentielle avec le nombre d'atomes car les traces des atomes sur la carte de Patterson se superposent. La fonction de Patterson est un instrument mathématique dans l'instrumentation, introduit dans le processus itératif d'élucidation des structures, et pour lequel de nouvelles techniques cristallographiques sont imaginées pour orienter le processus. Par exemple, ajouter des atomes lourds dans la structure, ou les substituer à certains atomes, permet de localiser un centre atomique sur la carte et de déduire les positions relatives des autres atomes.

L'introduction de cette fonction de Patterson a un autre effet important. Son calcul est direct depuis les données de diffraction (amplitude de structure F^2). L'opérateur peut calculer sans détour les synthèses de Fourier correspondantes, en deux et trois dimensions. De manière parallèle à la méthode des séries doubles de Bragg, cela centre la question de l'interprétation cristallographique sur les calculs de Fourier, de manière encore plus systématique : le besoin d'instruments de calcul pour ces séries devient rapidement plus pressant.

C. Inventer de nouveaux instruments pour le calcul des synthèses de Fourier

1. Un instrument pour les sommes de Fourier : les bandes de Lipson-Beevers

S'il est un instrument de calcul utilisé massivement par les cristallographes des années 1930 aux années 1960, ce sont bien les bandes de Lipson-Beevers. Ces bandes sont produites à quelques centaines d'exemplaires au cours de ces décennies et envoyés dans tous les laboratoires à travers le monde¹⁶³. Leur usage peut se voir comme une procédure très rodée

¹⁶³ Selon les estimations, entre 400 et 500 exemplaires des boîtes sont fabriquées et expédiées jusqu'en 1970 (Beevers et Lipson 1985).

d'un outil bien conçu, néanmoins la conception de ces bandes et la procédure d'utilisation relèvent d'un travail d'analyse numérique important. Cette conception vise à combiner, toujours dans un compromis, précision des calculs, rapidité d'un calcul devenu intensif, facilité d'utilisation et encombrement réduit d'un dispositif qui contient des milliers de bandes de papier.

L'importance de ces bandes tient non seulement à leur utilisation quotidienne, mais aussi au fait qu'elles sont la matrice de plusieurs autres instruments : soit des bandes plus précises et en plus grand nombre qui témoignent du perfectionnement permanent de l'instrument ; soit des tentatives d'automatisation des calculs qui s'inspirent ou étendent les principes de conception de ces bandes. Ces tentatives donnent lieu à l'invention de systèmes spécifiques (mécaniques, électro-mécaniques ou électriques) ou à l'utilisation de machines génériques comme les machines mécanographiques. Cela avant l'heure des calculateurs électroniques digitaux et des ordinateurs, mais pour lesquels les algorithmes sont aussi inspirés de la mise en bandes de Lipson-Beevers.

Dans le cadre du développement de la FTIR, un physicien comme P. Fellgett a eu recours à ces bandes pour les premiers calculs de spectre dans les années 1950 : ce n'était alors qu'une tentative d'utilisation d'un outil déjà existant, hors de son contexte de conception. Cet essai est sans comparaison avec le processus d'instrumentation en cours dans la cristallographie, incorporant un système de calcul efficace des composantes de Fourier qui va devenir omniprésent. Mais c'est un signe de la circulation de ces bandes à proximité de ces laboratoires de cristallographie.

Les bandes sont imaginées par un tandem de deux physiciens, Henry Lipson (1910-1991) et Arnold Beevers (1908-2001), impliqués dans le groupe de recherches cristallographiques de W.L. Bragg, à l'Université de Manchester. Leur article de 1934 détaille la conception et décrit les bandes¹⁶⁴. La méthode est discutée par J.M. Robertson¹⁶⁵ qui propose une alternative dans le mode d'élaboration des bandes. La forme la plus courante des bandes est fabriquée à partir de 1936.

D'où vient l'idée d'utiliser des bandes de valeurs numériques précalculées ? Au début des années 1930, Lipson et Beevers étudient le cristal de sulfate de cuivre¹⁶⁶ suivant la méthode que Bragg a élaborée en 1929, en empruntant également les instruments de son laboratoire (dont le spectromètre ionisateur qui est l'instrument fétiche de ces premières heures de la diffraction de rayons X). Ils mesurent eux-mêmes les valeurs du facteur de structure F_{hk} pour les différents h et k . Partant de ces mesures, l'objectif est de calculer des séries de Fourier en chaque point de coordonnée (x,y) de la cellule élémentaire : calculer toutes les valeurs des $\cos(hx+ky)$, les multiplier par F_{hk} et les additionner. Leur calcul doit se limiter à quelques termes de la série (nécessairement tronquée). La cellule de base est divisée en 60 parties : avec les symétries, cela revient à considérer 60 valeurs possibles pour x et 30 pour y , soit $60 \times 30 = 1800$ points pour

¹⁶⁴ « A rapid method for the summation of a two-dimensional Fourier series » (Beevers et Lipson 1934) et avec plus de détails dans (Lipson et Beevers 1936).

¹⁶⁵ La méthode de Robertson est plus précise (ses bandes ayant 3 chiffres significatifs) mais plus lente, et somme toute l'approximation à 3 chiffres n'est pas cruciale dans les années 1930 étant donné que les relevés cristallographiques des coefficients F ne sont précis qu'à quelques % près. (J. Monteath Robertson 1936a).

¹⁶⁶ Pentahydrate de sulfate suivre $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (aussi communément appelé « Vitriol bleu »).

lesquels il faut réaliser les sommes de Fourier. Les opérations sont donc répétitives et fastidieuses.

En décembre 1933, Beevers suggère d'utiliser la formule trigonométrique $\cos(hx+ky) = \cos(hx).\cos(ky) - \sin(hx).\sin(ky)$. Si la formule paraît démultiplier le nombre d'opérations, les regroupements de termes permettent en fait de les simplifier et aboutissent à se reposer sur les valeurs $A.\cos(hx)$ et $B.\sin(hx)$. En effet à h fixé, on peut additionner les valeurs des $F_{hk}\cos(ky)$ pour tous les y , puis se servir de la somme comme coefficient de $\cos(hx)$. Pour une valeur de h , il n'y a plus que $2k$ additions, au lieu de $h.k$ dans l'opération directe. Par ce procédé numérique, les sommations en deux dimensions sont en quelque sorte réduites à une dimension.

En vue de systématiser le procédé, Lipson et Beevers impriment les valeurs numériques des $A.\cos(hx)$ et $B.\sin(hx)$ sous forme d'un tableau numérique, découpé ensuite en bandes. Pour obtenir la somme trigonométrique recherchée l'opérateur doit choisir les bandes correspondantes, les aligner, puis additionner les chiffres inscrits dans les cases.

La construction de ces tables est le fruit de plusieurs simplifications et approximations. Tout d'abord les coefficients A et B , les variables h et x sont tous discrétisés : les tables sont composées des valeurs de $A.\sin 2\pi h(n/60)$ et $B.\cos 2\pi h(n/60)$. A et B prennent des valeurs entre 1...99, h entre 1...99, n entre 0...15. Les propriétés des fonctions trigonométriques sont évidemment exploitées pour réduire au minimum le nombre de tables nécessaires. Pour chaque valeur de h , il y a donc une table avec les entrées A et n (en lignes et colonnes).

Exemple d'une bande $A.\sin 2\pi h(n/60)$

Le premier chiffre est l'amplitude A (= 99), le « S » pour « sinus » (« C » pour « cosinus »), le chiffre suivant est h (= 3). La liste de chiffres qui suit correspond aux valeurs trigonométriques pour tous les $n = 0...15$ (donc 16 cases). Au verso de la bande sont imprimées les valeurs pour $-A$. Les chiffres indiqués avec une barre sont négatifs (valeur à soustraire).

99	S 3	0	31	58	80	94	99	94	80	58	31	0	$\overline{31}$	$\overline{58}$	$\overline{80}$	$\overline{94}$	$\overline{99}$

En outre, les valeurs imprimées sont entières : afin de minimiser les erreurs de calcul dans les additions (faites souvent de tête par l'opérateur) les concepteurs ont arrondi toutes ces valeurs à 2 chiffres significatifs. Même lorsque l'opérateur utilise une machine à additionner, le procédé est plus efficace.

Pour la conception de l'instrument, tout est analysé jusqu'aux détails de la procédure de sélection et de rangement des bandes dans leur boîte. Les boîtes sont en forme de « V » pour permettre de retirer et replacer les bandes au bon endroit après utilisation¹⁶⁷. L'instrument standard est constitué de deux boîtes avec respectivement 2079 bandes de cosinus et 1980

¹⁶⁷ (Lipson et Beevers 1936, p. 776) indique : « The strips are kept in two similar wooden boxes, one for cosine strips and one for sines. All the strips of one index are kept in one compartment, the partitions between the compartments being made of aluminium. The sloping sides of the boxes ensure that on removal of one strip from a compartment its place shall be left open for its reinsertion. If desired the boxes may be made portable by fitting them with lids, some device being used to clamp the strips ».

bandes de sinus, rangées dans des compartiments (16 compartiments pour autant de valeurs de $n=0\dots 15$) – voir Figure 25. L'opérateur peut associer une machine mécanique pour additionner les chiffres, avec l'avantage supplémentaire que certaines machines impriment les résultats au fur et à mesure, pour mémorisation et vérifications possibles.



Figure 25 - Deux boîtes de bandes de Lipson-Beevers – type 1936 (collection du Science Museum Londres)

L'instrument se construit donc à la mesure du problème cristallographique, et, comme pour tout instrument, il est évalué, retouché, perfectionné, adapté. La question des erreurs, dont les sources sont diverses, est centrale dans l'évaluation du dispositif : évaluer les erreurs générées par le mode de calcul discrétisé et approché, fruit d'une analyse numérique du système des bandes ; évaluer les erreurs résultant de la troncature des séries de Fourier ; erreurs qui proviendraient des incertitudes dans les mesures de diffraction, qui se répercutent directement dans des erreurs sur les coefficients de Fourier des séries à calculer.

Les questions mathématiques sous-jacentes sont complexes. La question de la troncature des séries est soulevée dès le début de la méthode des séries de Fourier¹⁶⁸, mais l'évaluation systématique et générale est trop difficile. Sur ce point, la rigueur de l'évaluation cède au pragmatisme d'une solution qui fonctionne : l'évaluation est faite *a posteriori* sur des structures connues, avec toute la part d'arbitraire qui va avec.

Le physicien, et pionnier de l'informatique, Andrew D. Booth (1918-2009) produit une analyse complète de la méthode des séries en trois dimensions, au sujet des coordonnées atomiques, entre 1945 et 1947. Booth montre que les erreurs de calcul sont insignifiantes pour les coordonnées atomiques. Le cristallographe William Cochran (1922-2003) souligne que les erreurs de calcul sont potentiellement plus problématiques pour l'élaboration des cartes de

¹⁶⁸ (W. L. Bragg et West 1930).

densité électronique. Il aboutit néanmoins en 1948 au fait que, dans la majorité des cas, les erreurs dans les approximations résultant du calcul par les bandes sont moindres que les erreurs de mesure et que des bandes à trois chiffres significatifs sont adéquates dans tous les cas¹⁶⁹.

Si l'utilisation des bandes va perdurer jusque dans les années 1960 comme moyen courant de laboratoire, les dispositifs dérivés des bandes sont nombreux. Ils visent à accélérer encore le procédé, à gagner en précision sur les calculs, à automatiser tout ou partie de l'instrument. Plusieurs autres compromis sont testés.

2. Méthodes alternatives avec des tables ou des bandes

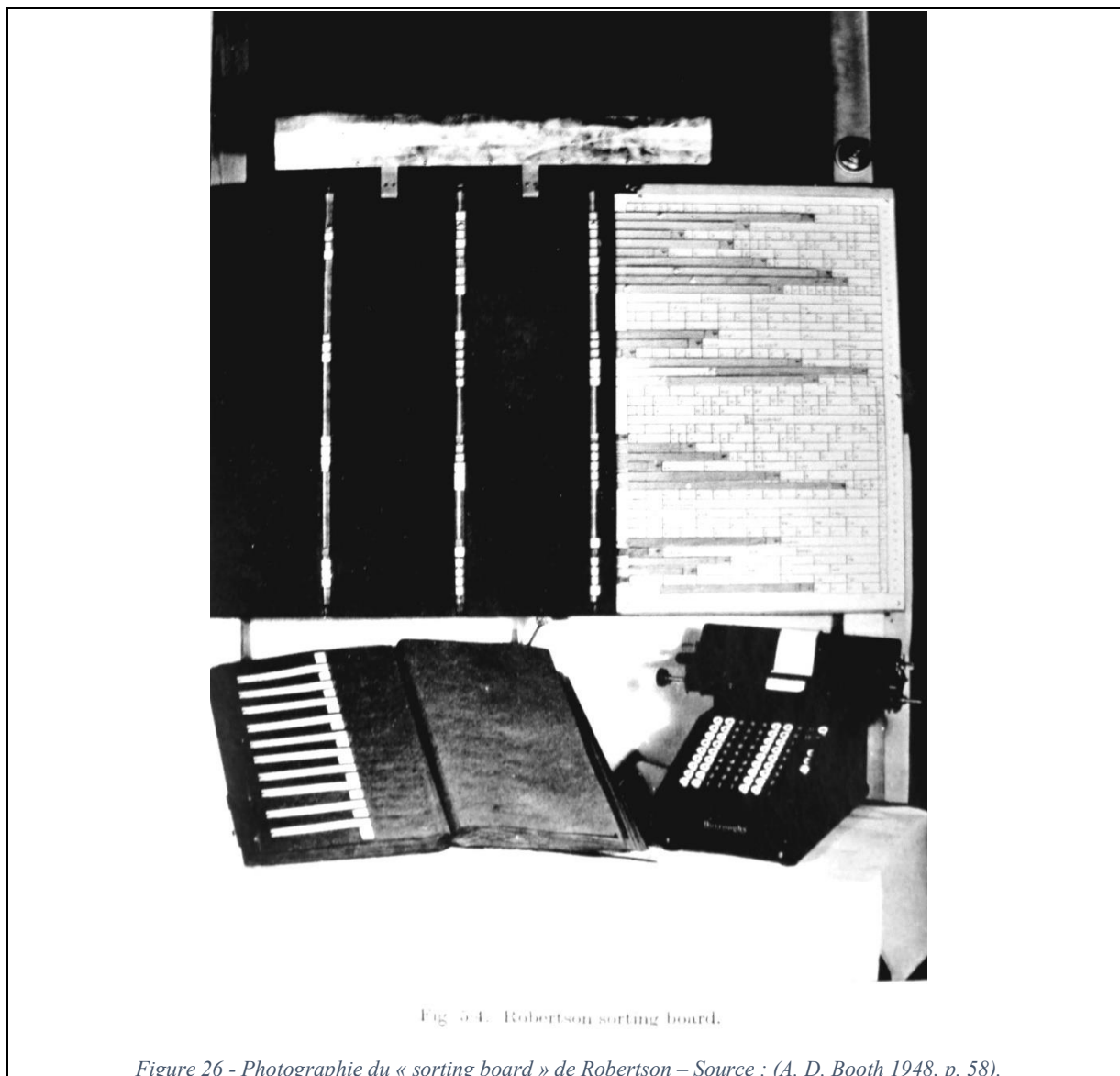
a) La « *sorting board* » de Robertson - 1936

John Monteath Robertson (1900-1989), cristallographe de premier plan¹⁷⁰, promeut un autre choix de conception avec sa « *sorting board* », qui repose toujours sur l'idée d'inscrire les résultats d'opérations trigonométriques sur des bandes de papier. L'analyse numérique est un peu différente et l'usage de la « *sorting board* » s'appuie sur un système de sélection des bandes plus perfectionné. Ce sera le premier dispositif d'une longue série d'instruments de Robertson.

Pour gagner un ordre de grandeur dans la précision, le choix initial se porte sur une plus grande amplitude dans les coefficients A (de 0 à 1000). Si on reste dans la logique de Lipson-Beevers cela aurait pour effet de multiplier des bandes, mais Robertson choisit de limiter les bandes aux valeurs $h=1$ et $n=1..15$. Pour les autres valeurs de $\cos(2\pi h.n/60)$ il existe un équivalent sur une autre bande. Le système est manipulé par l'opérateur de manière très différente : les bandes coulissent dans des rails, l'opérateur aligne les bandes selon les repères de la partie droite de la planche, puis additionne les chiffres apparaissant dans les fenêtres en colonne de la partie gauche (voir Figure 26). Si l'ensemble est correctement paramétré les erreurs de lecture sur les colonnes sont minimisées. Une machine à calculer de bureau permet de faire les additions rapidement. Dans son principe et son usage pour un opérateur expérimenté, le dispositif permet de calculer vite. Néanmoins, la plupart des opérateurs choisiront le compromis de la simplicité des bandes de Lipson-Beevers. Ironie de l'histoire, les élèves de Robertson eux-mêmes reconnaissent utiliser les bandes de Lipson-Beevers.

¹⁶⁹ Les bandes classiques sont adéquates dès lors que les incertitudes sur les amplitudes mesurées ont une déviation standard inférieure à 2. (Cochran W. 1948).

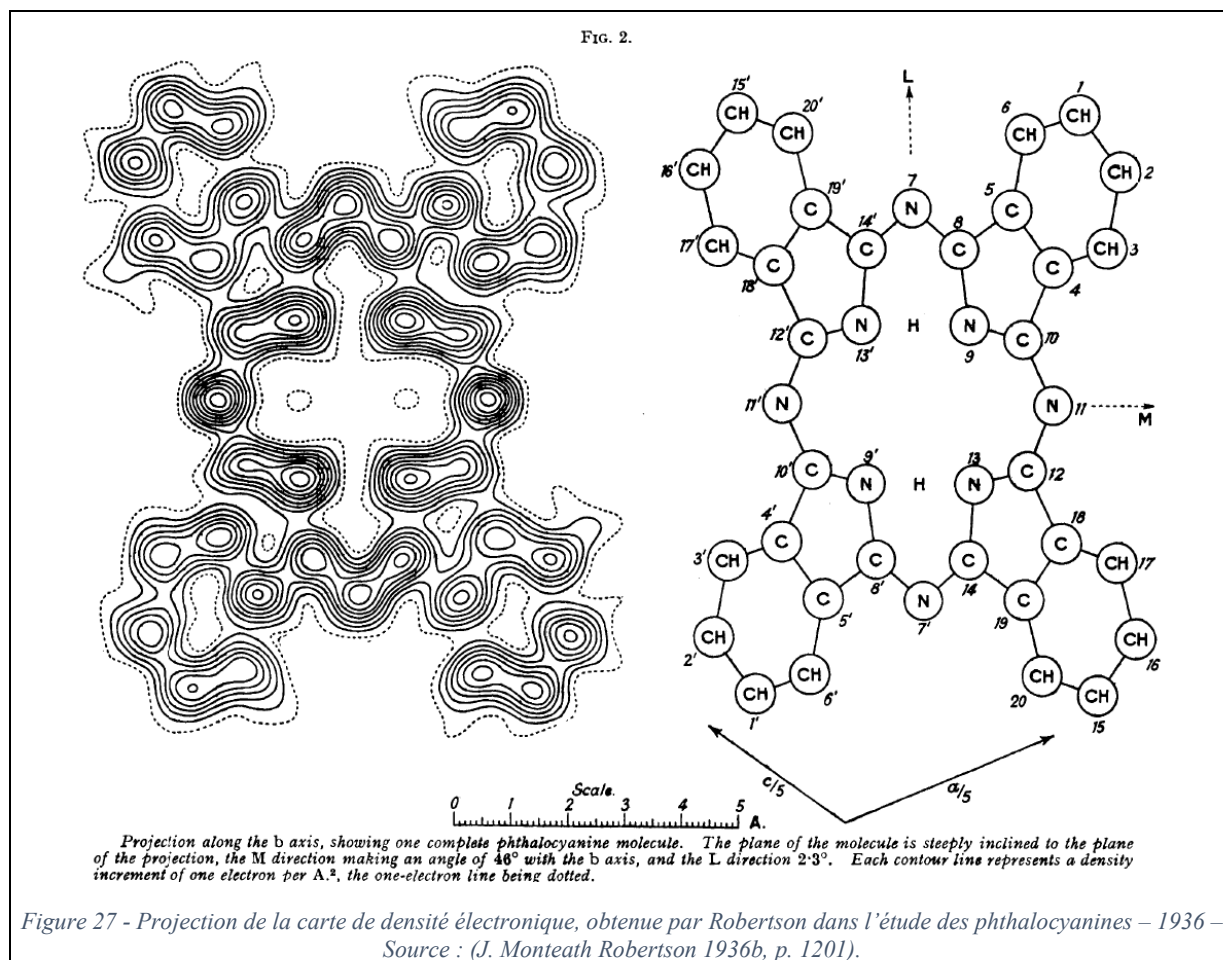
¹⁷⁰ Pour une biographie voir (Arnott 1994). Robertson est dans le cercle de W.H. Bragg à la Royal Institution sur les années 1920-1939 (après ses études à l'Université de Glasgow).



Le dispositif a été utilisé de manière probante par Robertson pour l'analyse des phtalocyanines en 1935-36, dont les résultats sont obtenus par les additions de plus de 200 000 termes¹⁷¹. Sur la figure ci-dessous, Robertson trace la projection d'une carte de densité électronique obtenue par les calculs, qui permet d'identifier les atomes constituant les cristaux (voir Figure 27)¹⁷².

¹⁷¹ En ordre de grandeur : 1800 sommes de Fourier, de 150 termes chacun. (J. Monteath Robertson 1936b).

¹⁷² Robertson calcule directement la densité électronique, en introduisant les phases dans les coefficients des séries. Les phases ont été obtenues par une astuce expérimentale, en deux séries de mesures : une première série de mesures de diffraction avec la structure simple, une seconde avec la structure à laquelle un atome a été ajouté. Les différences entre ces mesures permettent d'obtenir les informations sur les phases dans le cas présent. (J. Monteath Robertson 1935; J. Monteath Robertson 1936b).



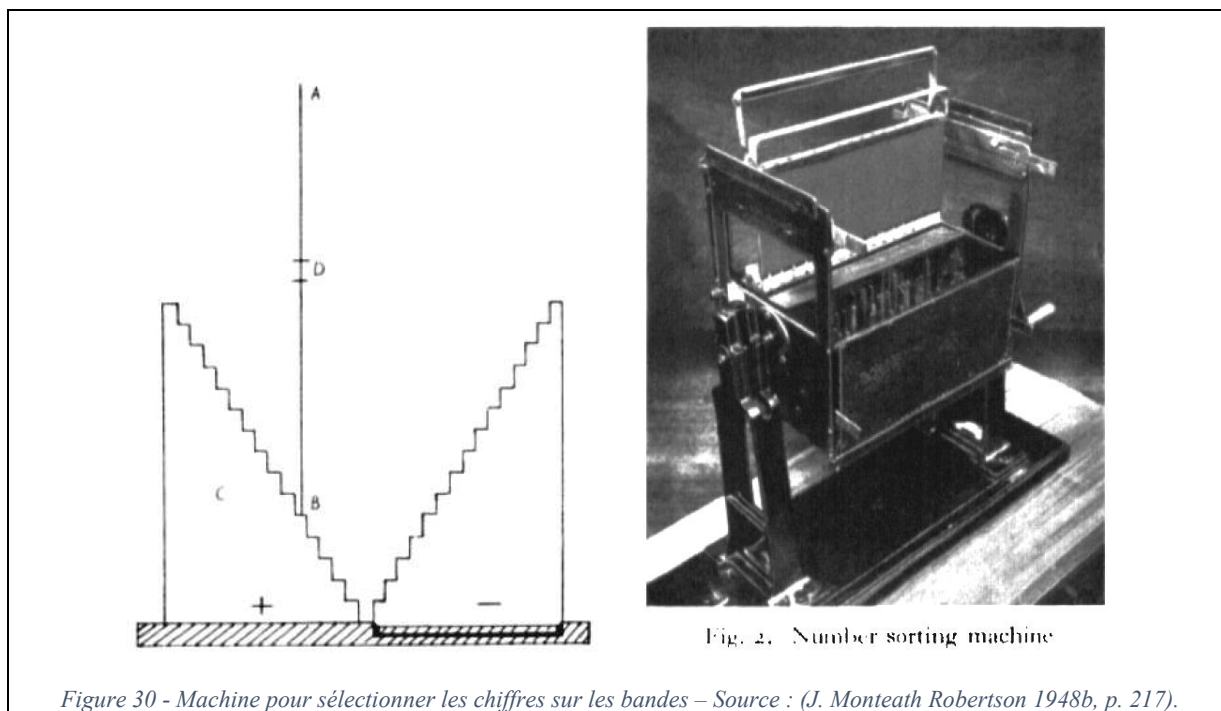
b) Les « stencils » de Patterson et Tunell - 1942

Sur le plan formel le système inventé par A. Patterson et G. Tunell aux débuts des années 1940 est proche de celui de Robertson¹⁷³. On y retrouve les mêmes astuces de calculs sur les séries trigonométriques, les regroupements de termes pour aboutir à des bandes précalculées de sinus et cosinus. Le choix de conception privilégie un compromis entre la précision (3 chiffres) et la facilité d'utilisation du dispositif. L'utilisateur sélectionne d'abord toutes les bandes utiles à la somme de Fourier. Selon le type de somme, il utilise des « stencils » (masques) pour repérer les valeurs à additionner (voir Figure 28). Pour une même série de bandes, on change de masques plutôt que de déplacer les bandes. Deux opérations sont indiquées par les masques : la sélection des valeurs et leur signe. Une valeur lue à travers un trou simple compte positivement, elle compte négativement si le trou est entouré (voir Figure 29). L'ensemble des bandes et des masques complique en réalité le système pensé par Robertson, d'autant plus qu'il existe une version des masques dans lesquels les signes $+$ ou $-$ sont indiqués par un choix de couleurs.

¹⁷³ (Patterson et Tunell 1942).

c) « Three-figure Cosine Factors for Fourier Analysis and Synthesis »
- Robertson 1948¹⁷⁴

Inspiré de la méthode « stencil » de Patterson et Tunnel, Robertson perfectionne à son tour le système de bandes, avec leur précision à 3 chiffres, avec un dispositif mécanisé pour la sélection des chiffres sur les bandes, avant les sommations. Le dispositif combine la compacité des systèmes à bandes, une rapidité équivalente à l'utilisation des bandes classiques, mais avec une précision supérieure, et une utilisation beaucoup moins fastidieuse. Le schéma et la photographie (Figure 30) montrent le dispositif de sélection imaginé par Robertson.



Toutes ces variations autour des bandes de Lipson-Beevers indiquent leur caractère structurant dans l'instrumentation. De nouveaux matériels et une analyse numérique permanente permettent de perfectionner le système, sans changer le principe dans son fondement. Les bandes n'ont quasiment aucun rival pour des cristaux dont la structure est abordable par ce système, malgré le caractère fastidieux des calculs. Les systèmes de « masques » inventés par Bragg sont la seule véritable alternative avec des principes optiques. Ces systèmes sont plus rapides, mais moins précis. Ils viennent compléter la panoplie des cristallographes. Les limites de tous ces systèmes ne seront évidentes qu'avec le changement de contexte lié à la guerre et aux projets d'analyse structurale de « grosses » molécules liées à la biologie.

3. La méthode des masques de Bragg-Huggins

Dans la foulée de la méthode des séries de Fourier doubles, Bragg a proposé la même année 1929 d'utiliser un procédé photographique pour additionner des sinusoides en deux dimensions¹⁷⁵ : une plaque photographique est exposée à une succession de masques sur

¹⁷⁴ Présentée en deux parties dans le *Journal of Scientific Instruments* : (J. Monteath Robertson 1948a; J. Monteath Robertson 1948b).

¹⁷⁵ (W. L. Bragg 1929b).

lesquels sont imprimées des franges de différents calibres et orientations. Les franges sont des sinusoides sous forme de figures alternativement opaques et transparentes. Le temps d'exposition d'une frange, qui représente une composante de Fourier, est proportionnel au terme F_{hkl} à introduire dans la synthèse. La plaque « additionne » au sens où elle absorbe les intensités lumineuses. Elle enregistre la superposition des expositions successives et réalise progressivement une synthèse de Fourier. La comparaison avec le système imaginé en 1956 par Lawrence Mertz, son « Optical Fourier synthesizer » pour la spectroscopie par transformée de Fourier, paraît évidente : Mertz s'en inspire en effet directement en cherchant à simplifier et mécaniser le principe¹⁷⁶.

Le principe est repris, élaboré et systématisé par Maurice L. Huggins entre 1941 et 1945¹⁷⁷, un physicien qui travaille aux Kodak Research Laboratories à Rochester (New York). Le masque hk (Figure 31) est obtenu par des procédés photographiques dans le meilleur laboratoire du monde sur le sujet. Un masque A (Figure 32) est d'abord photographié sur du Kodalith, qui permet des rendus très contrastés en noir et blanc. Le masque est ensuite inséré dans un agrandisseur de précision de Kodak dont la lentille est remplacée par une fente de 0,05 mm de large : la projection est exposée sur de la pellicule commerciale plus standard pour produire le masque B (Figure 33). Ce masque est ensuite réinséré dans le système agrandisseur-projecteur avec les temps d'exposition et les orientations correspondantes aux masques hk à réaliser. Au final, les masques sont tous de la même taille et calibrés en densité. À l'aide de cet ensemble de masques, il est possible de réaliser les calculs de synthèse de Fourier pour une structure un peu complexe en 30 minutes environ.

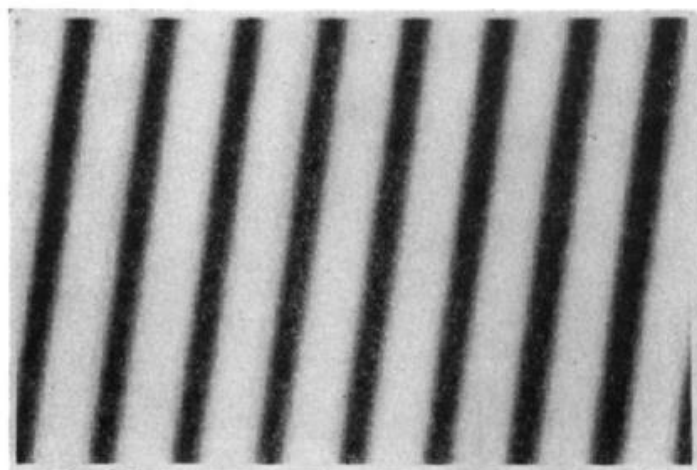


Fig. 3.— hk mask for $8\bar{I}$ term, with $F_{8\bar{I}0}$ negative.

Figure 31 - Exemple de masque hk – Source : (Huggins 1941, p. 67).

¹⁷⁶ Voir page 96 pour les détails du système. (Lawrence Mertz 1956, p. 548).

¹⁷⁷ Voir (Huggins 1941; Huggins 1944; Huggins 1945).

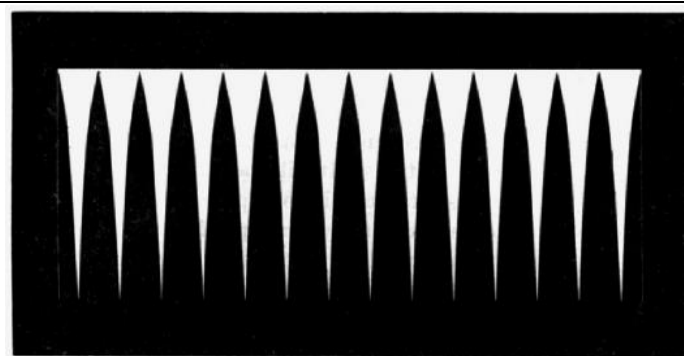


Fig. 1.—Mask A.

Figure 32 - Masque A - Huggins 1941 – Source : (Ibid.).

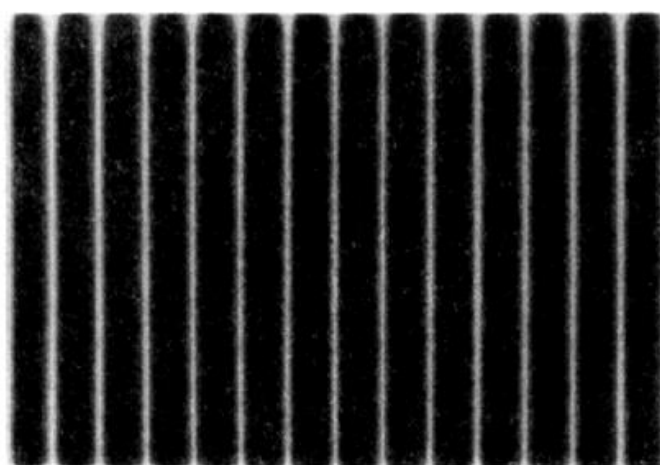
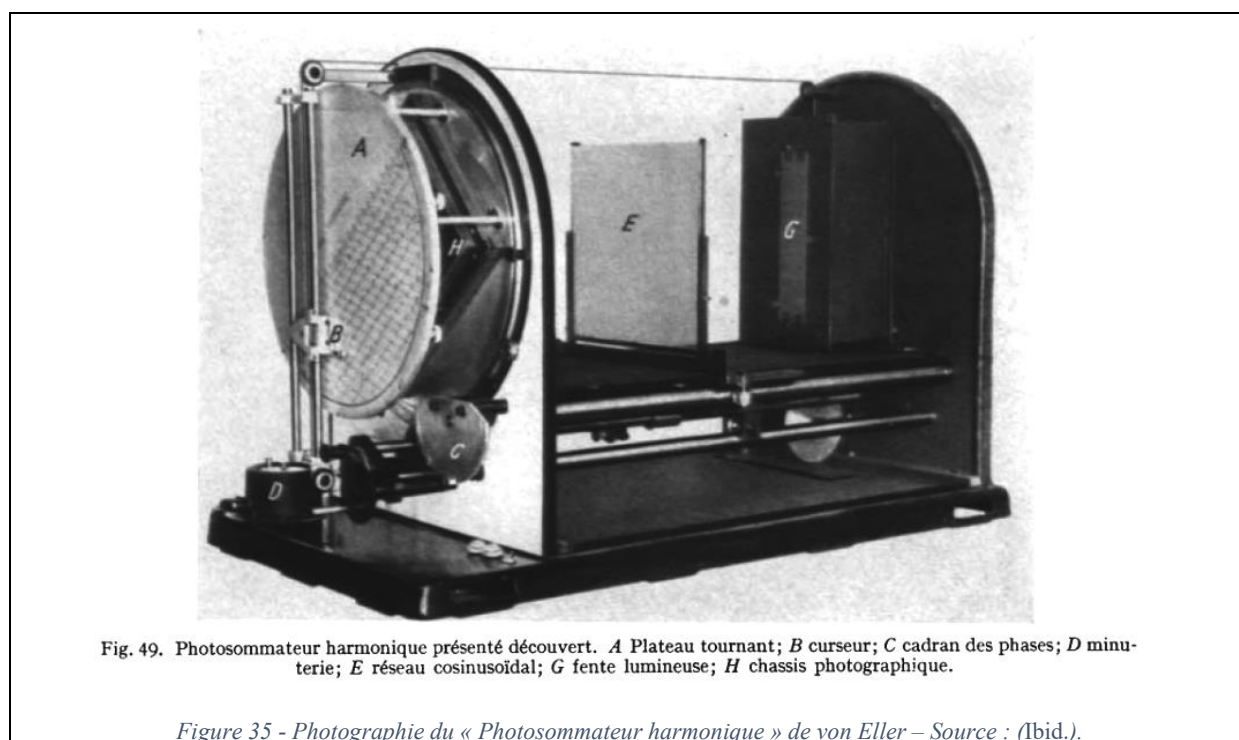
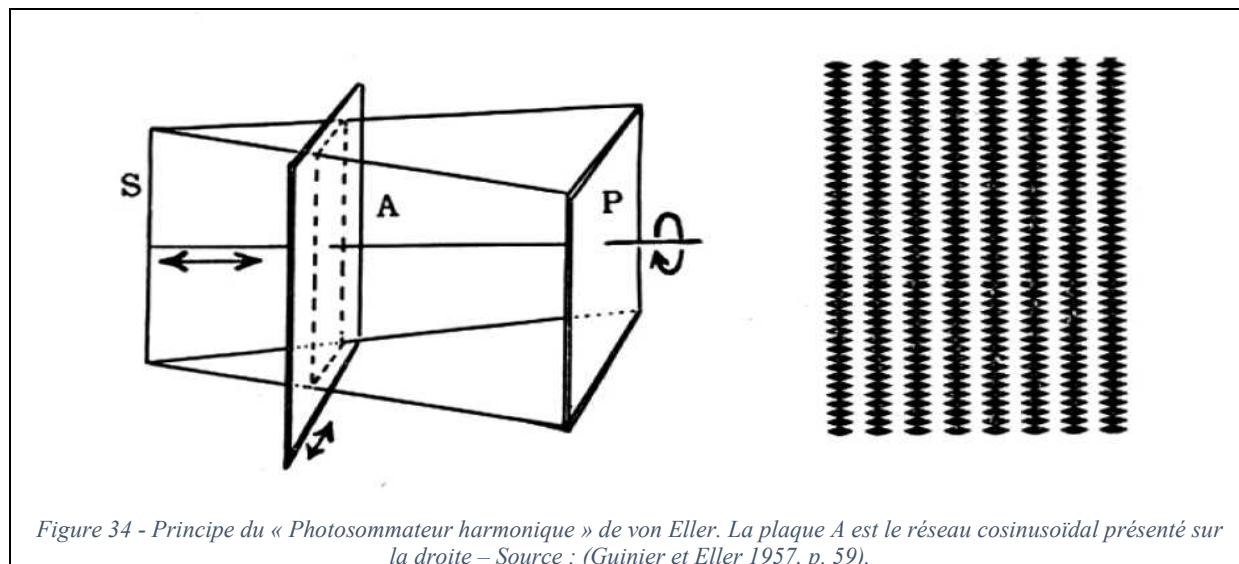


Fig. 2.—Mask B.

Figure 33 - Masque B - Huggins 1941 – Source : (Ibid.).

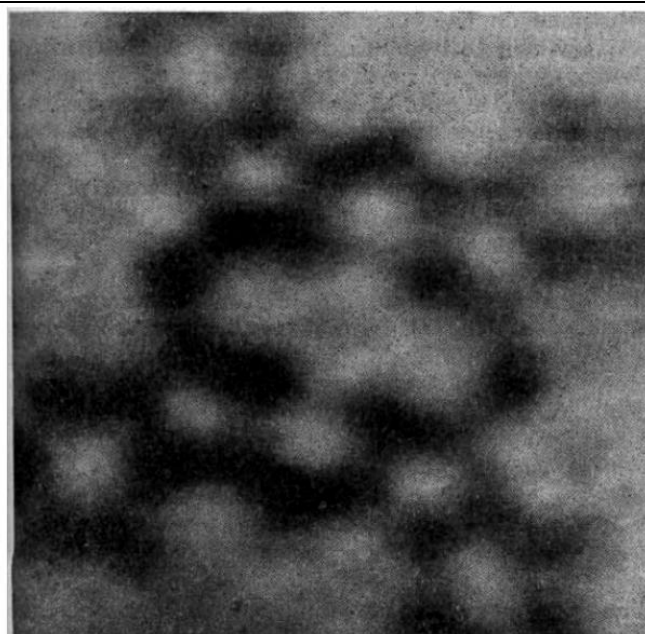
D'autres méthodes de production des masques sont développées par la suite, sur différents supports, films, pellicules ou encore micro-films¹⁷⁸. Parmi tous les systèmes de calcul imaginés, très peu trouvent des échos en France, mentionnons volontairement un des très rares dispositifs perfectionnés par Gérard von Eller à cette époque. Dans ses termes il s'agit de « calcul photographique » ou encore de la réalisation d'un « photosommeur harmonique ». Gérard von Eller termine sa thèse de physique sur le sujet en 1954, dans le Laboratoire de Chimie Cristallographique (Paris, Sorbonne) avec le meilleur radiocristallographe en France à ce moment-là, André Guinier (1911-2000). Le système de von Eller vise à simplifier les modes de production des franges nécessaires, en réduisant tout à un seul masque variable (A sur la Figure 34) et une seule source lumineuse (S sur la même figure).

¹⁷⁸ (Howell, Christensen et McLachlan 1951).



Les résultats des synthèses de Fourier sont des photographies, dont le caractère à la fois imprécis et heuristique est évident. Des premières réalisations probantes de 1945 (Figure 36) aux résultats plus assurés de 1957 de von Eller (Figure 37), le système est employé pendant deux décennies¹⁷⁹.

¹⁷⁹ D'autres exemples dans (Bru, Rodriguez et Cubero 1952; Eller 1955).



10⁻⁸ cm.

Fig. 2. PHOTOGRAPH OF A PHTHALOCYANINE MOLECULE, FROM X-RAY DATA BY ROBERTSON⁴.

Figure 36 - Essai de synthèse optique de Huggins de la molécule Phtalocyanine – 1945 – Source : (Huggins 1945, p. 19).

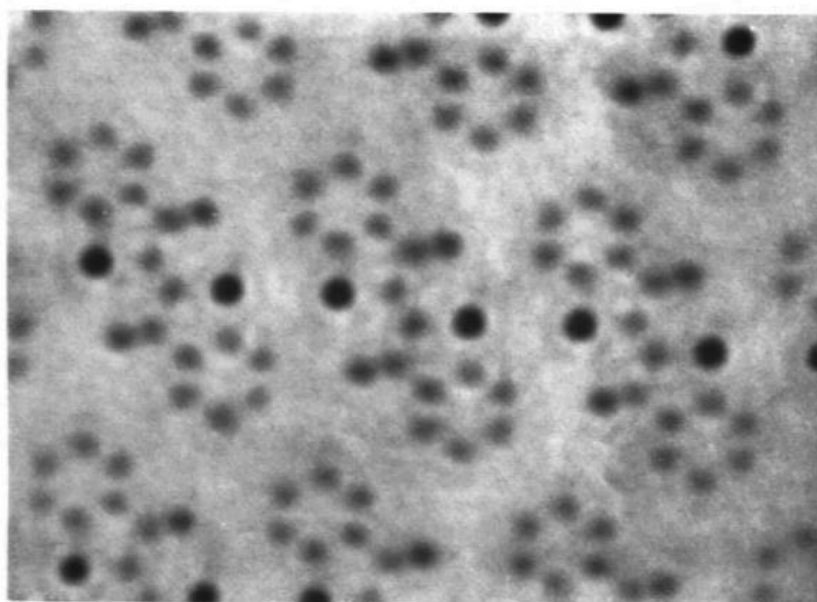


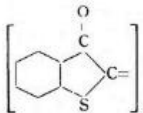
Fig. 48. Densité électronique du thioindigo  obtenue au moyen du photosommateur harmonique.

Figure 37 - Synthèse réalisée avec le « Photosommateur harmonique » - 1957 – Source : (Guinier et Eller 1957, p. 59).

Comme pour les dispositifs mécaniques ou pour les bandes, l'achèvement de l'instrument est sa déclinaison en un appareil compact, utilisable au laboratoire ou sur un bureau. Nous n'avons retrouvé qu'un seul système de ce type, datant de 1955.

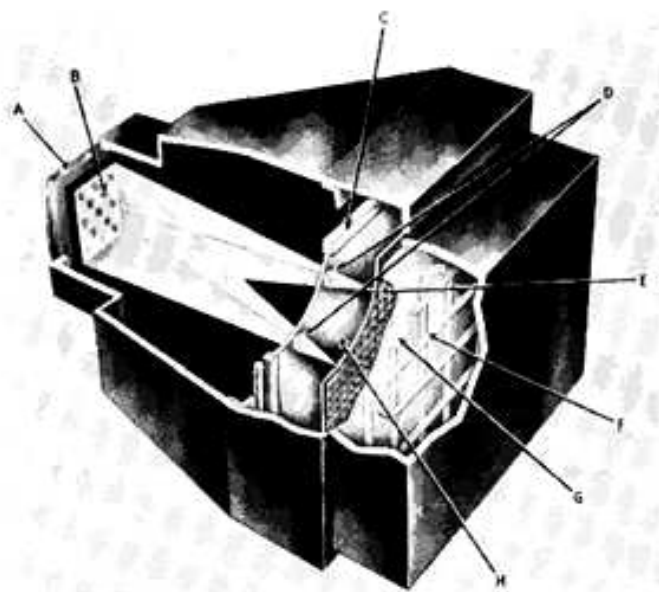


Figure 38 - Projecteur de table pour les masques Bragg-Huggins – 1955 – Source : (Howell et McLachlan 1955, p. 93).

Tous les masques sont fixes dans la machine, ils sont photographiés en miniature sur la plaque en verre D (Figure 38). Une seule source de lumière fluorescente, dans une boîte avec une façade en verre opalin suffit (partie G - Figure 38). Contre la façade en verre se trouve une feuille d'aluminium (partie E) perforée de trous contre-biseautés d'1 mm de diamètre : ce qui donne autant de petites sources lumineuses qu'il y a de trous, avec un seul éclairage par l'arrière. Les trous sont ajustés pour assurer une parfaite projection des masques sur la plaque B. L'opérateur sélectionne les masques en obturant, ou non, chacun des trous. Le résultat est lu sur la plaque A. Tout est affaire de compromis entre la facilité d'utilisation, la robustesse du système pour des résultats obtenus très rapidement et suffisamment fiables. Étant donné que les masques sont inamovibles, il n'y a pas de dérèglement possible et le mode de fabrication est répétable. Le fait de n'utiliser qu'une seule source lumineuse induit une uniformité relative des éclairages des masques.

Tous ces exemples sont dans la continuité des premières tentatives, soit avec les bandes de Lipson-Beevers, soit avec le principe optique de superposition de masques de Bragg. Dans le contexte de l'immédiat après-guerre, les extensions de ces principes et les instruments vont se multiplier à une cadence sans précédent.

D. L'essor du « calcul cristallographique »

1. Nouveau contexte, nouveaux instruments

Au cours de la seconde guerre mondiale, la détermination de la structure de la pénicilline a été désignée comme priorité scientifique en Angleterre. Pilotée par la cristallographe Dorothy Hodgkin l'élucidation de la structure, qui se termine en 1945, est une réussite éclatante, devenue emblématique de la cristallographie. Étant donné la complexité de la structure, Hodgkin s'était alors assurée de la collaboration d'un des meilleurs spécialistes du calcul scientifique John

Leslie Comrie (1893-1950), lequel a mis en œuvre, pour la première fois, les calculs cristallographiques sur machines mécanographiques de type Hollerith¹⁸⁰.

Ces travaux sur la pénicilline illustrent les transformations de la cristallographie, dans un mouvement qui combine plusieurs dynamiques dans les années 1940. Après la pénicilline en effet, les projets d'analyse des structures de molécules comme les protéines, dont les fonctions biologiques sont avérées, vont fleurir. Il s'agit de dépasser les structures cristallines des années 1930, d'aller vers les molécules « de la vie », toujours plus complexes. Un des initiateurs et promoteurs les plus influents est le physicien et cristallographe John D. Bernal (1901-1971), déclarant tout à la fois :

*The secret of life lies in the structure of proteins, and there is only one way of solving it and that is by X-ray crystallography.*¹⁸¹

*There must be a great development of analytic methods and means of calculation. We are only at the beginning of the development of mechanical and optical methods, and their improvement is very necessary as calculations are becoming a bottleneck. There is no use in being able to take photographs in a few seconds if calculations take months.*¹⁸²

En rapport direct avec cette évolution vers la complexité, le cadre théorique change progressivement. Il n'est pas réinventé car la méthode des séries de Fourier est toujours valable, mais élargi avec une mise en avant de la transformée de Fourier : en effet la clause de « périodicité » des cristaux n'est plus valable universellement pour les macromolécules, qui sont étudiées pour elles-mêmes et non pour les cristaux qu'elles pourraient produire. Le processus de diffraction, repensé avec la transformée de Fourier, restructure les chemins de la recherche structurale, non sans peine. Et, fait nouveau par rapport à la période des années 1930, des mathématiciens vont entrer dans le jeu.

Le contexte de la guerre a mis une pression sur l'aboutissement de l'élucidation de la structure de la pénicilline. La pression ne se dément nullement par la suite, au contraire, puisque rien ne semble résister aux moyens de l'analyse structurale si ce n'est la quantité de calculs nécessaires. Mais avec la transformée de Fourier, pour la cristallographie, le défi du calcul change aussi, et il est très relevé : si l'objet théorique est bien connu, les moyens de calculer directement des transformées de Fourier ne le sont pas. Tout comme en spectroscopie FTIR, il n'existe pas de méthode mathématique et de moyen général « tout prêt » pour calculer. Il existe néanmoins des moyens spécifiques, liés au processus de diffraction d'une part, et les instruments mathématico-optique seront les premiers instruments au service de ces transformées de Fourier, d'autre part.

De nouveaux instruments vont faire leur apparition pour répondre aux multiples problèmes d'une instrumentation en pleine expansion : en termes de mécanisation, d'automatisation de synthèses de Fourier, d'utilisation des matérialités optiques et électroniques, dont l'ordinateur n'est qu'un aspect. Le contexte au sortir de la seconde guerre mondiale est marqué par le fort développement du calcul scientifique, par les voies électromécaniques ou électroniques et l'essor de l'ordinateur. Mais l'histoire du calcul cristallographique n'est pas un simple basculement dans les technologies informatiques. De multiples instruments mathématiques, dont la diversité a été quelque peu oubliée avec le temps,

¹⁸⁰ Cf plus loin des détails sur ces travaux, voir aussi (Chadarevian 2002, p. 110-112).

¹⁸¹ Citation de M. Perutz, reprenant les termes de Bernal en 1936, dans (Perutz 1997, p. xvii).

¹⁸² (Bernal 1945, p. 714).

coexistent et trouvent des ressorts aussi bien du côté des techniques analogiques que numériques.

2. La transformée de Fourier comme nouvel instrument

Le cadre introduit par les Bragg entre 1915 et 1929 détermine l'horizon de recherche en cristallographie pour de nombreuses années : l'interprétation par analogie, la méthode des séries de Fourier doubles et les instruments mathématiques associés sont indispensables à l'instrumentation dans son ensemble. Mais un cadre d'interprétation plus général est resté en arrière-plan, et les premiers à avoir mis en avant une interprétation en termes de transformée de Fourier sont A. Patterson et Paul Peter Ewald (1888-1985), dès les années 1920. Le résultat de Patterson publié¹⁸³ en 1927 a été en quelque sorte occulté par le succès de la fonction F^2 de Patterson. Pourtant il indique déjà en 1927 que le réseau réciproque d'une molécule quelconque, c'est-à-dire un assemblage d'atomes qui n'aurait pas la périodicité d'un cristal, est directement lié à la transformée de Fourier spatiale de ce groupe d'atomes.

D'où Patterson tire-t-il sa démonstration de 1927 ? Lorsqu'il élabore son résultat, Patterson est à Berlin, au Kaiser-Wilhelm Institute für Faserstoffchemie, en plein contexte d'émergence de la Mécanique quantique en Allemagne. Il se rapproche de Max von Laue, assiste aux séminaires les plus avancés sur la physique du moment. Et il prend surtout à bras le corps le traité de physique-mathématique de référence, publié en allemand en 1924, *Methoden der mathematischen Physik*¹⁸⁴, qui est couramment appelé le « Courant-Hilbert » du nom de ses deux auteurs Richard Courant (1888-1972) et David Hilbert (1862-1943). L'ouvrage est conçu à destination des physiciens : il est une sorte de pré-instrumentation de savoirs mathématiques pour la physique. Les deux premiers chapitres sont consacrés à l'algèbre linéaire et à l'analyse de Fourier. C'est le point de départ de son « obsession » pour la transformée de Fourier, qui le conduit aux échanges avec Wiener et l'invention de la série F^2 .

Mais, puisque la cristallographie est surtout occupée aux structures des cristaux, la transformée de Fourier se ramène à des séries de Fourier du fait de la périodicité de ces molécules - cristaux supposés parfaits et infinis. La méthode de Bragg de 1929, si elle a pu être inspirée par ce cadre général, et par une analogie avec la transformée de Fourier dans le domaine de l'optique, se recentre sur les structures périodiques.

À la faveur des orientations de la biologie des protéines, des molécules biologiques de grande taille, ce cadre général devient pertinent. La transformée de Fourier prend un rôle d'instrument privilégié de l'analyse. Peu nombreux sont les cristallographes, avant la guerre, à contribuer à ce cadre renouvelé même si le terrain se prépare¹⁸⁵. Le texte le plus abouti est le traité publié par Dorothy Wrinch (1894-1976) en 1946 *Fourier Transforms and Structure factors*¹⁸⁶ : c'est une mathématicienne de premier plan¹⁸⁷, intéressée par la théorie de la

¹⁸³ (Patterson 1927).

¹⁸⁴ (Courant et Hilbert 1924).

¹⁸⁵ En particulier (Hettich 1935; Knott 1940). Ils font les calculs de transformée de Fourier de molécules comme le benzène, la naphthalène pour montrer les propriétés de superposition et décomposition possibles avec les transformées de Fourier : la figure de diffraction du cristal de naphthalène étant la superposition de la transformée de deux molécules élémentaires.

¹⁸⁶ (Wrinch 1946).

¹⁸⁷ Ses mentors ont été les mathématiciens emblématiques Bertrand Russel et Godfrey H. Hardy. Sur la vie scientifique, mathématique, et les combats politiques de D. Wrinch : (P.G. Abir-Am 1993; P.G. Abir-Am 2009; Senechal 2007).

biologie, qui réalise une synthèse des vingt années précédentes de travaux théoriques sur le sujet, avec une systématisation et une rigueur mathématique remarquable. Un traité qui fourbit les bases de l'analyse structurale cristallographique modernisée et dont s'emparent les cristallographes de tous bords.

Tout cela ne serait qu'un cadre théorique s'il n'était pas instrumenté pour l'analyse structurale expérimentale de molécules nouvelles. Cette instrumentation prend plusieurs formes : des atlas et des tables de transformée de Fourier de fonctions connues ou précalculées ; des moyens d'utiliser les instruments existants en ramenant tant que faire se peut les calculs à des synthèses de Fourier ; et des nouveaux instruments optiques.

Nous allons tenter de saisir comment le cadre général évolue et proposer une catégorisation, si possible exhaustive, des diverses perspectives instrumentales. Pour cela nous nous appuyerons sur un événement important pour la communauté en 1950 : la première conférence dédiée à la question du calcul cristallographique, organisée par Raymond Pepinsky (1912-1993) à Penn State University (Pennsylvanie) sous l'égide de l'Office of Naval Research (un des organismes de financement des recherches après-guerre aux États-Unis, dépendant de l'US Navy). À travers les présentations et les discussions, et du fait de la présence de tous les acteurs importants sur le sujet, la conférence donne une photographie très claire et pratiquement complète de l'état de la question.

3. La conférence de 1950 – « Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis »

Les propos introductifs de la conférence¹⁸⁸ annoncent les recherches en cours et affichent la cohabitation entre l'orientation très forte souhaitée par l'ONR, en la personne de la mathématicienne Mina Rees (1902-1997) directrice de la Division of Mathematical Sciences¹⁸⁹, sur les calculateurs digitaux et les multiples projets analogiques en développement, dont le plus important est le X-RAC de Pepinsky financé par le même ONR. Il apparaît très vite que les spécificités du calcul cristallographique rendent nécessaires ces projets instrumentaux à la fois sur base analogique et numérique parce qu'ils sont prometteurs d'usages différents dans l'analyse cristallographique.

Le second point tout à fait remarquable est l'invitation faite aux mathématiciens de collaborer dans l'analyse des problèmes théoriques. Dans son propos introductif Pepinsky déclare:

[...] I can say that another of the chief purposes of this assembly, and perhaps its most promising aspect, lies in the attraction of the attention of competent mathematicians to the phase problem. It is particularly heartening for me to see in this audience Bernard Friedman, Mina Rees, John Curtis and Elliot Montrool, and to have had occasion to discuss these problems with other mathematicians even though they could not be present.¹⁹⁰

¹⁸⁸ L'ensemble des contributions a été publié en 1952, incluant une très longue annexe sur la machine de Pepinsky, le X-RAC (Ray Pepinsky 1952).

¹⁸⁹ L'ONR est actif dans tout le financement des mathématiques appliquées, de la physique, des « computer sciences » dans l'après-guerre aux États-Unis, et Mina Rees est une personnalité tout à fait centrale dans cette organisation. (Shell-Gellasch 2002; Sapolsky 1990).

¹⁹⁰ (Ray Pepinsky 1952, p. 8).

Le problème des phases, qui donne son titre à la conférence, est posé en termes mathématiques¹⁹¹ pour espérer ouvrir de nouvelles voies analytiques, et dépasser les contributions initiales de Patterson, appuyées par les travaux de Wiener. Les contributions restent symboliques mais elles soulignent en creux le manque de discussions mathématiques dont ont souffert les approches cristallographiques jusque-là. En d'autres termes, les aspects mathématiques ont été pris en charge par les physiciens, qui se sont auto-disciplinés mathématiquement et sont devenus des praticiens des mathématiques déterminants dans le processus d'instrumentation en cristallographie.

Il s'en suit une série de présentations dressant l'état de l'art des instruments existants ou en cours de développement, pour contourner le problème des phases. Ces éléments sont le point de départ d'un tour d'horizon des dispositifs des années 1950. Leur présentation est organisée de manière à faire écho à la discussion des instruments de calcul des spectres en FTS. Dans un premier temps, nous aborderons les solutions de continuité avec la pratique établie avant-guerre : les mécanisations des systèmes existants, en l'occurrence les bandes de Lipson-Beevers. Dans un deuxième temps, nous détaillerons des instruments plus originaux : les solutions optiques promues par W. L. Bragg, puis les solutions qui reposent sur l'électronique analogique (X-RAC de Pepinsky) et numérique, c'est-à-dire l'entrée des ordinateurs dans le calcul cristallographique.

4. Mécaniser et automatiser les synthèses de Fourier

Dans une continuité avec les dispositifs inventés dans les années 1930-40, Robertson a élaboré une machine mécanique de calcul rapide des synthèses de Fourier au tournant de 1950. Ses projets reposent sur une analyse minutieuse des méthodes de calcul et implémentations possibles dans des machines mécaniques : c'est ce qui fait l'objet de sa conférence en 1950. Comment ramener les calculs à des sommes de Fourier à une dimension et quels organes mécaniques utiliser pour générer les valeurs des fonctions trigonométriques ? Robertson distingue deux grands types de machines. Dans le type I, les valeurs des fonctions $A_n \cos(nT)$ sont calculées les unes après les autres, stockées puis additionnées ; dans le type II tous les $A_n \cos(nT)$ sont produits simultanément à un temps T , puis additionnés, avant de passer au temps suivant. L'analyseur harmonique de Kelvin est du type II. Robertson, dans son analyse numérique et mathématico-instrumentale, privilégie celles de type I parce que la vitesse et la précision sont davantage maîtrisables.

Il aboutit à la réalisation de son « Fast digital computer for Fourier operations » en 1954, autrement baptisé RUFUS (Figure 39 et Figure 40), transposition totalement mécanique des méthodes de bandes : le dispositif est réalisé à partir de mécanismes d'engrenages qui réalisent les fonctions trigonométriques (15 générateurs correspondants aux bandes). Les résultats sont directement imprimés sur papier. Son accessibilité, sa compacité et sa simplicité d'utilisation sont des marques de fabrique de Robertson, qu'il oppose aux systèmes concurrents du moment : la lourdeur des machines mécanographiques, les faiblesses des calculateurs électroniques et leur indisponibilité pour la majorité des cristallographes. Le RUFUS possède un avantage supplémentaire sur les machines manuelles car il fonctionne à grande vitesse : l'entraînement mécanique peut tourner à 6000 tours/minute.

¹⁹¹ Dans deux contributions : « The mathematical and computational problems of X-ray analysis » de J.M. Bijvoet (Université d'Utrecht) et « Mathematical aspects of the phase problem of crystal structures » B. Friedman (Institute for Applied mathematics, New York University).

Les machines de Robertson témoignent du soin apporté à des compromis qui ne sont pas une simple projection de la dichotomie entre analogique et numérique. Elles visent à automatiser tout ce qui est répétitif dans les calculs, à exploiter toutes les propriétés mathématiques des fonctions trigonométriques, par tous les moyens mécaniques ou autres, pour aboutir à des dispositifs rapides simples et compacts.

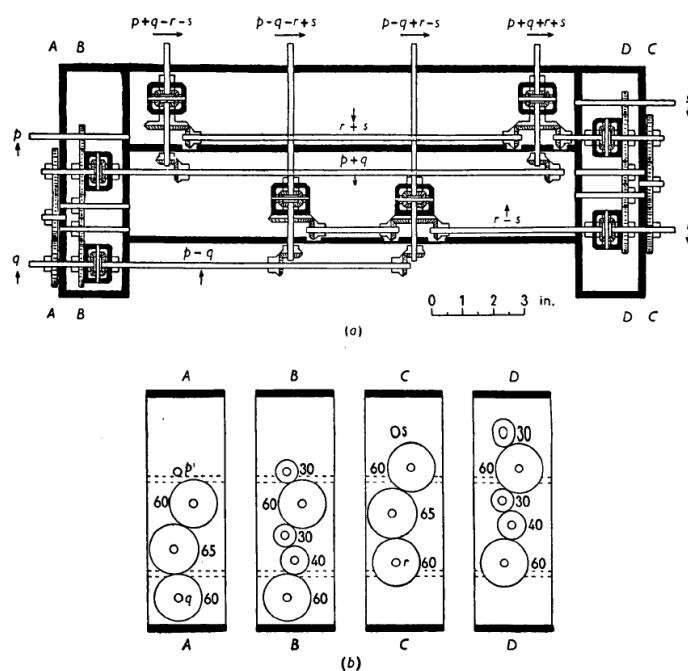


Fig. 3. (a) Totalizer unit for combining sub-totals. (b) End view of gearing in totalizer unit.

J. MONTEATH ROBERTSON

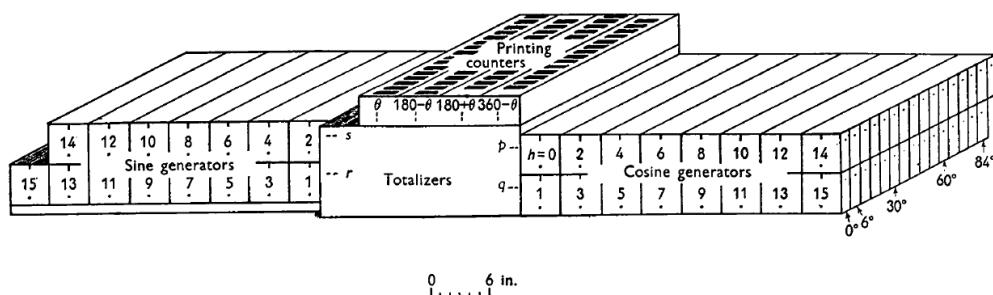


Fig. 4. Diagrammatic view of computer.

Figure 39 - Schémas de principe du RUFUS de Robertson : générateurs à engrenages / vue d'ensemble - 1954 - Source : (J. Monteath Robertson 1954, p. 820-821).

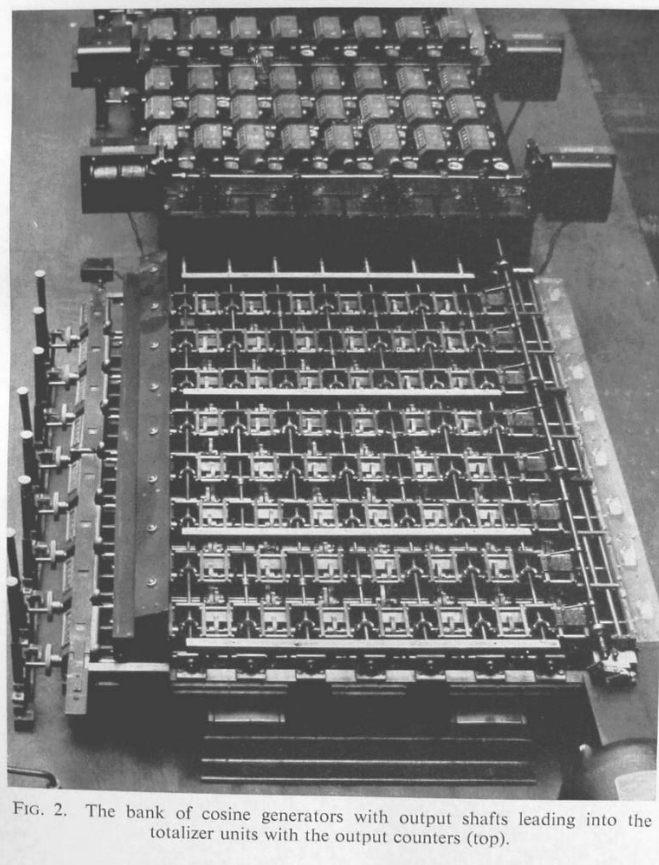


Figure 40 - Photographie du prototype du RUFUS de Robertson – 1955 – Source : (Ray Pepinsky, Robertson et Speakman (eds.) 1961, p. 25).

Dans la même veine mécanique, le cristallographe Vladimir Vand (1911-1968) entreprend fin 1946 de construire une machine mécanique dédiée au calcul de Fourier pour les structures atomiques¹⁹². Le projet initial est un ambitieux système complexe à 1 millions de billes et des rails pour les guider afin de réaliser les opérations trigonométriques. Il est simplifié en 1950 pour construire un appareil en Meccano, suffisant pour des calculs approchés sur des structures à 100 atomes¹⁹³. Bragg fait construire un appareil de ce type à Cambridge, sorte de préliminaire à une collaboration avec Vand. En effet la conférence que Vand donne à Cambridge en mars 1949 est l'occasion d'un rapprochement avec le groupe de Bragg, William Cochran et Francis Crick en particulier. C'est Vand qui initiera à l'automne 1951 des calculs de structure atomique « en hélice », dans l'effervescence entourant les recherches sur la structure des molécules en biologie moléculaire.

Au fil de ses positions académiques, Vand s'illustre dans la conception de calculateurs et dans les méthodes numériques pour la cristallographie. En 1953 paraît le traité de référence écrit avec Pepinsky : *The statistical approach to X-ray structure analysis*¹⁹⁴. Il termine sa

¹⁹² (Solcova et Krížek 2011) donne une biographie de Vand et quelques indications sur ses projets de machines, dont la plupart n'ont donné lieu ni à publication ni à brevets.

¹⁹³ La machine est présentée dans la revue Meccano en 1951 (Vand 1951) et les détails mécaniques ont été publiés dans la plus sérieuse revue *Journal of Scientific Instruments* en 1950 : (Vand 1950).

¹⁹⁴ (Vand et Pepinsky 1953).

carrière à l'Université PennState, aux côtés de Pepinsky, comme professeur de Cristallographie, tout en étant consultant pour IBM dès 1956, dans le centre de R&D de la firme à New York.

5. Le recours à la mécanographie pour le calcul de structure

Nous avons indiqué que les travaux d'analyse structurale de la pénicilline ont été un succès grâce à la mobilisation de nouvelles techniques mécanographiques pour les synthèses de Fourier. Piloté par la cristallographe Dorothy Hodgkin à l'Université d'Oxford, celle-ci a fait appel aux services de l'astronome Leslie John Comrie (1893-1950) et ses assistants au *Scientific Computing Service*, première entreprise commerciale dédiée au calcul scientifique, fondée en 1937 par Comrie. Il a adapté une méthode utilisée pour les calculs astronomiques de positions de la Lune, développée lorsqu'il était au Nautical Almanac Office de Greenwich dans les années 1920¹⁹⁵. L'idée d'utiliser les machines d'Hollerith¹⁹⁶ pour le calcul cristallographique est dans les esprits déjà dans les années 1930 et elle est sujette à débat¹⁹⁷.

Dans les années 1940, entre les succès des calculs, ceux sur la pénicilline qui ont beaucoup marqué les esprits, et la diffusion de méthodes d'utilisation des machines pour le calcul scientifique, les machines mécanographiques trouvent une place importante dans l'analyse structurale des grandes molécules. En Angleterre, l'utilisation de la mécanographie se répand entre Oxford, Cambridge et Manchester, lieux qui deviennent « historiques ». Le groupe d'Ernest G. Cox (1906-1996)¹⁹⁸ à l'Université de Leeds installe un service de mécanographie, bientôt étendu aux calculs sur ordinateurs. Il bénéficie de l'expertise de Cox, un collaborateur de Dorothy Crowfoot (devenue Hodgkin à son mariage en 1937) depuis les années 1930 et devient rapidement une référence dans le domaine. Outre-Atlantique la donne est légèrement différente et les méthodes se développent de manière indépendante : au California Institute of Technology (Caltech) autour du chimiste Linus Pauling (1901-1994), la mécanographie devient une technique très développée, liée aux moyens considérables qui sont mis à disposition (voir Figure 41).

¹⁹⁵ Dans les théories du mouvement de la Lune interviennent également des calculs d'harmoniques (termes périodiques du type $a.\sin(b+c.t)$). (Comrie 1932).

¹⁹⁶ Dans les termes des protagonistes de cette période, une machine d'Hollerith désigne une machine mécanographique du type commercialisé par IBM (International Business Machine) ou BTM (British Tabulating Machine). (Cox et Jeffrey 1949).

¹⁹⁷ La discussion dans (Beevers 1939) entre Comrie, Cox et Beevers montre les avantages et inconvénients de ces méthodes. Pour Beevers les machines Hollerith ont un inconvénient majeur : « The simplest synthesis would require several days for the results to come to hand ». Pour Comrie, l'utilisation de machines commerciales, sans nécessité de développer des machines spécifiques, est un gage d'utilisabilité des machines Hollerith.

¹⁹⁸ Voir sa rapide biographie écrite par (Cruickshank 2000).

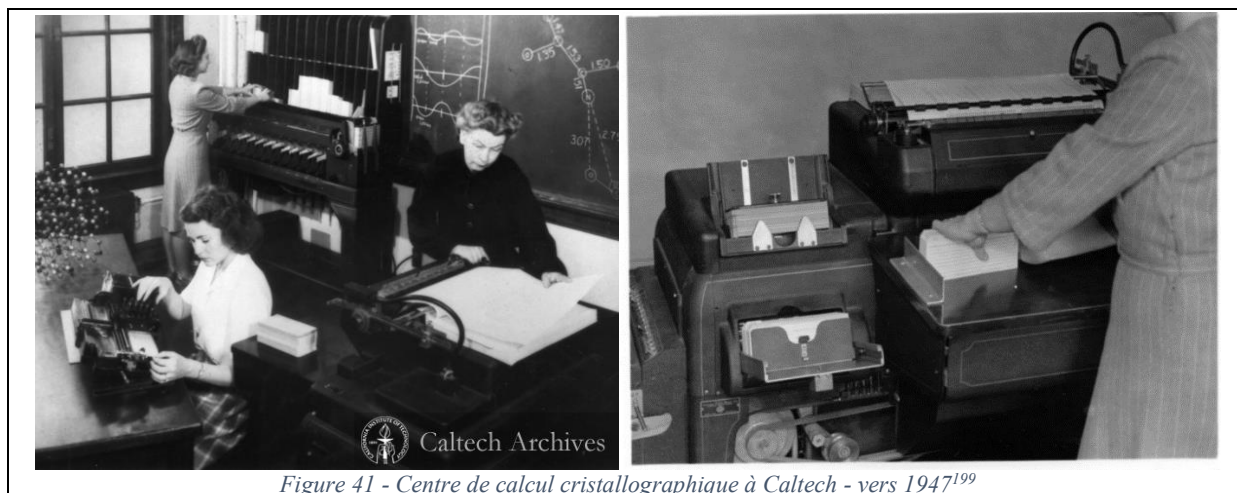


Figure 41 - Centre de calcul cristallographique à Caltech - vers 1947¹⁹⁹

L'utilisation de la mécanographie est pour l'essentiel une adaptation de la méthode des bandes de Lipson-Beevers, une traduction technique des bandes dans le système mécanographique. L'artefact change : les résultats des calculs trigonométriques sont inscrits sur des cartes perforées (voir l'exemple sur la Figure 42), ensuite insérées dans la tabulatrice de type Hollerith pour les additions en grand nombre.

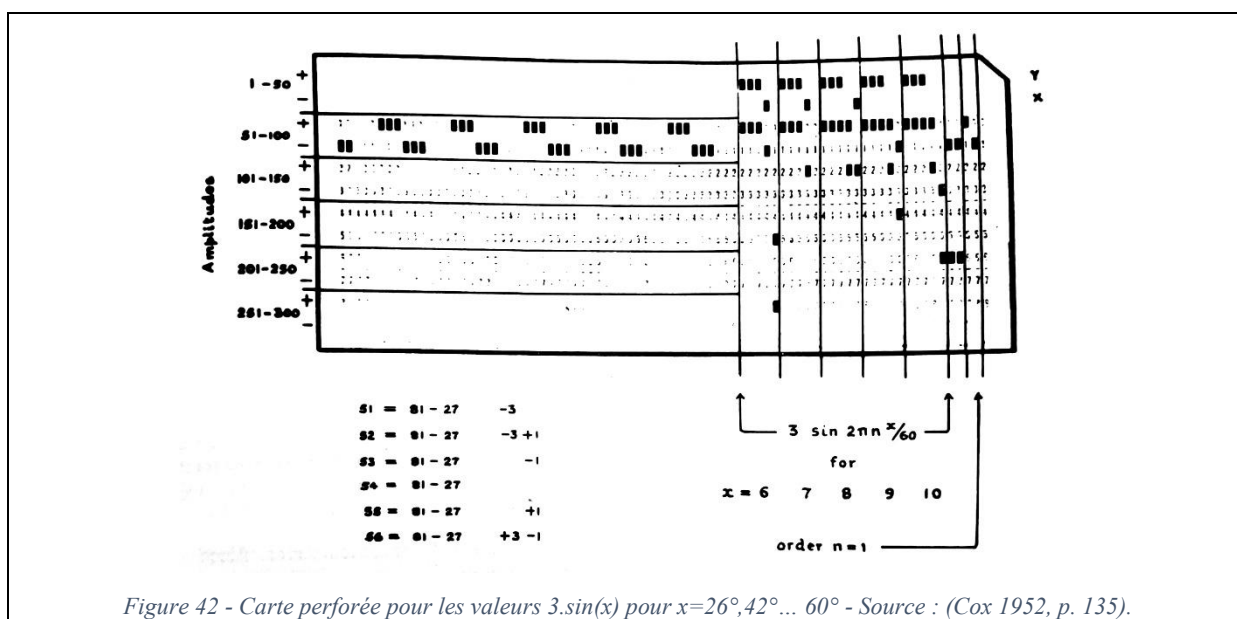


Figure 42 - Carte perforée pour les valeurs $3 \cdot \sin(x)$ pour $x=26^\circ, 42^\circ \dots 60^\circ$ - Source : (Cox 1952, p. 135).

Le gain en rapidité, une fois le système installé, est évident pour les opérateurs. Mais installer le système signifie au préalable perforer des jeux de cartes pour les calculs : contrairement à la relative universalité des bandes de Lipson-Beevers, il y a là un travail préalable et constant à produire pour les opérateurs. Il faut imaginer des méthodes automatisées pour inscrire les fonctions trigonométriques sur les cartes, il faut pouvoir facilement reproduire les cartes car l'utilisation par la machine détériore les cartes au fur et à mesure.

¹⁹⁹ Le centre est entièrement équipé de machines IBM et les méthodes sont adaptées à ces machines. [URL : <https://www.iucr.org/gallery/1947/caltech> consulté le 31 mars 2019].

Par ailleurs, si la « carte Hollerith » est universelle, les modèles et les fonctionnalités des machines varient d'un fabricant à l'autre, il faut s'adapter à la machine disponible²⁰⁰ : à titre d'exemple, dans les années 1940 les machines IBM (machines américaines) sont capables de soustraire des nombres inscrits sur les cartes, mais les machines de BTM (machines britanniques) ne proposent pas cette option. Il faut trouver des astuces pour soustraire des nombres : l'inscription des nombres négatifs peut se faire par la méthode des compléments, comme dans les anciennes machines arithmétiques ; le « double-punching » est une autre option, une adaptation du mode d'impression recto-verso des bandes²⁰¹.

Une fois ces conditions réunies, l'opérateur sélectionne les cartes et procède avec la machine. Il n'y a plus ni calculs mentaux à faire, ni à utiliser de machine à calculer de bureau. Cette accélération du traitement va rendre possible l'augmentation de la précision des calculs : sur les cartes, les résultats des sinus et cosinus sont inscrits jusqu'à 5 chiffres significatifs, contrairement aux 3 chiffres des bandes les plus précises. Après la guerre, le groupe organisé par Cox à Leeds installe, entre 1945 et 1947, une sorte de système type²⁰² avec 492 cartes concentrant ainsi les milliers de bandes de Lipson-Beevers, garantissant une précision élevée et une utilisation possible pour des synthèses de Fourier en deux et trois dimensions.

Pour le reste les développements sont des variations autour de ce point de référence, et les perspectives sont très parallèles aux mécanisations imaginées pour les bandes, et pour les mêmes raisons : si les opérations algébriques sont automatisées, il reste toujours la question de la sélection des cartes pour la synthèse cherchée, source d'erreurs potentielles. Enfin, la principale évolution qui se dessine est le passage à une inscription des fonctions trigonométriques en binaire : ce format 0 ou 1 est plus adéquat au principe même des cartes perforées. Au total, la transposition des bandes dans la mécanographie n'est pas de nature à changer fondamentalement les données de l'analyse numérique du principe. La problématique est plutôt celle de la juste adéquation à trouver entre le type de calcul, sa précision, sa rapidité, les capacités des machines et l'usage par un opérateur spécialisé. Ce dernier point n'a rien d'anecdotique. Car le mécanographe est un technicien spécialisé. Une division du travail tout à fait nouvelle s'installe en cristallographie. Elle est aussi une redéfinition du territoire des mathématiques du calcul avec la délégation à un service de calcul. A. Beevers, toujours dans la recherche de machines de « proximité » avec les cristallographes, y voit un inconvénient majeur depuis longtemps : « it is a great disadvantage for the computation to be outside the direct control of the investigator »²⁰³.

C'est la raison pour laquelle, inspiré par les machines mécanographiques mais voulant alléger le système, Beevers conçoit en 1939 un système électrique spécialisé, reprenant les opérations prévues sur les bandes. Il imite les mécanismes de la mécanographie, avec un sélecteur et des compteurs pour automatiser les additions. La machine génère directement des impulsions électriques correspondant à une bande de sinus particulière²⁰⁴ : le nombre d'impulsions générées est la valeur prise par la fonction trigonométrique, arrondie aux entiers.

²⁰⁰ Outre l'opération de soustraction, le nombre de compteurs ou encore les possibilités de faire des opérations de multiplications varient d'une machine à l'autre. (Cox et Jeffrey 1949).

²⁰¹ Pour un éventail des adaptations imaginées voir la synthèse (Cox 1952).

²⁰² Présenté dans ces grandes lignes dans la revue *Nature* (Cox, Gross et Jeffrey 1947) .

²⁰³ (Beevers 1939, p. 661).

²⁰⁴ Les impulsions correspondant aux valeurs de la fonction $u = A \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot (p/60))$ pour $n=1$, et toutes les valeurs de p , simultanément.

Un second système de sélecteurs permet d'arranger les signaux électriques pour obtenir les impulsions correspondant aux autres fréquences, donc les bandes adjacentes²⁰⁵. Les impulsions sont ensuite transmises aux compteurs pour les additions (ou soustractions, selon le signe correspondant). De nouvelles impulsions sont générées pour la bande suivante, ajoutées aux compteurs, et l'itération se poursuit ainsi. La machine fonctionne donc sans cartes perforées mais sur le principe de comptage électrique emprunté aux machines à carte perforée.

La solution technique est étendue et fabriquée par la suite pour la thèse de Douglas MacEwan²⁰⁶, supervisée par Beevers et achevée en 1942. La conception évolue vers une base technique électrique standard, celle de la téléphonie et la radio. La concordance technologique est assez claire avec les systèmes de génération d'impulsions électriques du monde de la radio et les relais des centraux téléphoniques. En outre ce sont des composants du marché, peu chers à l'exception des rares composants très spécifiquement adaptés ou construits pour la machine. Au final, tout est commandé électriquement dans la machine : les valeurs numériques des bandes sont produites dans la machine, par les systèmes d'impulsions, il n'y a pas de cartes perforées, ni besoin de sélectionner des bandes dans des boîtes. Cela restera malgré tout une machine de laboratoire, non produite en série, qui permet des sommes de Fourier en quelques secondes.

Dans la pratique, au sortir de la guerre, les bandes sont les instruments les plus utilisés, pour toutes les « petites » synthèses, pour des déterminations de structures plus routinières, plus simples. Mais les machines Hollerith sont devenues incontournables pour les synthèses de grande ampleur. Une des réussites emblématiques est l'analyse de la « Horse methaemoglobin » par Max Perutz, à Cambridge chez Bragg : Perutz publie²⁰⁷ en 1948 les cartes de Patterson complètes réalisées par le Scientific Computing Service (SCS) de Comrie. Le nombre d'opérations est considérable : 7000 termes de Fourier à additionner, sur les 58 621 points de la carte de densité, soit 410 millions d'opérations. Cet exploit compte parmi les calculs les plus grands réalisés dans les années 1940 par le SCS, à la hauteur des révisions des tables astronomiques et mathématiques auxquelles Comrie contribue depuis longtemps²⁰⁸.

E. Les instruments du calcul cristallographique, entre technologies analogiques et numériques

En parallèle de la mécanisation croissante des solutions existantes, deux autres types d'artefacts vont se présenter comme des alternatives particulièrement prometteuses : l'optique et l'électronique, analogique puis numérique. Les débats et les multiples voies du développement des instruments font penser aux enjeux détaillés dans le cadre de la FTIR : entre performances, précision, rapidité du résultat et modes d'usages différenciés, les mêmes grandes constantes polarisent ces débats. Mais l'opposition entre les solutions analogiques et numériques est plus franche que dans la FTIR, traversant toutes les années 1950, à l'image du débat affleurant dans la conférence de 1950, et débordant dans les années 1960 largement.

²⁰⁵ Les autres valeurs de n dans la fonction trigonométrique u (note précédente).

²⁰⁶ « A Machine for the Rapid Summation of Fourier Series » (Macewan et Beevers 1942).

²⁰⁷ (Perutz 1949).

²⁰⁸ (Croarken 1990).

Nous présenterons d'abord les solutions optiques inventées pour réaliser ces calculs de Fourier, de manière très empirique. Un bon nombre d'entre elles sont des solutions de continuité et des solutions « du milieu ». Celles proposées par W.L. Bragg sont particulièrement emblématiques de ce physicien-opticien capable d'apprivoiser toutes les lumières²⁰⁹, du visible aux rayons X, pour innover dans son domaine de la cristallographie et du calcul cristallographique. Il deviendra un promoteur du « calcul optique », au-delà des besoins du calcul cristallographique. Tout cela se situe dans le contexte anglo-américain pour l'essentiel : ce calcul optique trouvera une autre expression en France, dans le milieu de l'optique physique et autour des travaux de Pierre-Michel Duffieux, figure ici totalement absente de ces recherches empiriques.

L'entrée de l'électronique dans la cristallographie se fait en différents lieux et dans différentes cultures scientifiques et techniques. Entre analogique et numérique, le X-RAC de Pepinsky est le projet phare, le plus cité, le plus marquant. Pour les débuts de l'utilisation des calculateurs électroniques numériques, l'autre lieu, crucial, est le Cambridge Mathematical Laboratory, dans lequel est conçu l'ordinateur EDSAC.

1. W.L. Bragg et le calcul optique

Le principal initiateur d'instruments mathématico-optiques pour résoudre les problèmes de calcul cristallographique est sans conteste W.L. Bragg. Dans la continuité de ses inventions relatives aux méthodes cristallographiques, et puisqu'il s'agit de faire des calculs de Fourier d'une manière ou d'une autre, Bragg a proposé d'instrumenter différents artefacts optiques. Les masques de Bragg-Huggins ne sont qu'une première modalité, nous l'avons vu. Sa conférence de 1944 indique les raisons du choix de l'optique (de la lumière visible) pour réaliser les instruments en question. Elle s'intitule « Lightning Calculations With Light »²¹⁰. Après avoir rappelé la démarche qui prévaut dans l'analyse cristallographique, reposant sur des calculs répétés de figures de diffraction de structures hypothétiques à comparer aux résultats expérimentaux, Bragg souligne l'importance de « tout » moyen susceptible de faire gagner un temps précieux dans les calculs et explique :

I wish in this account to describe some methods of making light do our calculations for us. These methods are not precise as those of computation, at any rate yet. They are rough and ready, but quick, and I think they are promising and may be developed into a really useful tool. It is as if we were doing an approximate sum with a slide rule, to see whether the answer is about right, before turning to the logarithm tables for a more precise calculation. I have therefore called this discourse "Lightning calculations with light".²¹¹

Par principe, les calculs à partir d'artefacts optiques sont donc rapides mais peu précis. Bragg les envisage avant tout comme des moyens heuristiques pour déterminer des structures qu'il faut préciser avec des formes de calculs numériques plus exacts dans un second temps. Ces instruments de calcul analogique, qu'il compare à la règle à calcul, entrent dans les méthodes hypothèse-essai-calcul-erreur de la cristallographie de la période 1930-60. On peut indiquer tout de suite que ces instruments optiques seront développés et utilisés jusque dans les années 1960.

²⁰⁹ Le titre donné à la biographie de W.L. Bragg est particulièrement bien choisi : *Light is a messenger* (Hunter 2004).

²¹⁰ Le texte a été publié dans la revue *Nature* la même année : (W. L. Bragg 1944).

²¹¹ (*Ibid.*, p. 69).

Dans ces instruments, l'artefact est un dispositif optique, utilisé pour ses propriétés optiques dans le domaine visible. Trois artefacts sont combinés : des « trous d'aiguille » (« pinhole ») qui ont la propriété de faire une diffraction de Fraunhofer et donc une transformée de Fourier spatiale d'une image à l'infini ; des lentilles optiques qui ont la propriété de réaliser une transformée de Fourier d'une image dans le plan focal de la lentille ; et des plaques photographiques, qui sont un moyen d'enregistrement cumulatif d'intensités lumineuses, elles font une addition d'intensité et servent en tant qu'opérateur algébrique. Les combinaisons de ces artefacts permettent de simuler différents processus de Fourier, pour faire des synthèses de Fourier (les masques Bragg-Huggins) et des transformées de Fourier. Tout repose sur l'analogie construite entre les dispositifs optiques de diffraction et les expériences de diffractions de rayons X : la transformée de Fourier est l'artefact mathématique commun, qui peut être instrumenté dans chacun de ces domaines, et qui permet d'établir les rapprochements instrumentaux entre des domaines.

W.L. Bragg a indiqué le chemin du développement de deux instruments réalisables et utiles en cristallographie, pour deux fonctions complémentaires : le « microscope à rayons X » pour révéler une structure cristalline sur la base de clichés de diffraction et la caméra « Fly's eye », une méthode indirecte d'exploration de structures cristallines.

a) *Le « X-ray microscope » de Bragg*

Le principe du « X-Ray Microscope »²¹², le microscope à rayons X, est posé par W.L. Bragg en 1939. Puisque les rayons X ne peuvent pas être focalisés il n'est pas possible de faire un équivalent strict de microscope optique avec des rayons X. Les informations des rayons X diffractés doivent être converties en des informations lumineuses équivalentes et le processus de diffraction accompli jusqu'à son terme avec ces rayons lumineux. Bragg propose de présenter les données de diffraction X sous forme d'un masque avec des trous, chaque trou étant tel qu'il transmet une intensité lumineuse proportionnelle à la valeur F^2 du rayon X réfléchi correspondant. Chaque masque représente une section du réseau réciproque. Le masque est placé sur le chemin optique d'un faisceau de lumière parallèle, qui est focalisé par une lentille à grande focale. Le motif de diffraction dans le plan focal de cette lentille – une diffraction de Fraunhofer – est l'image recherchée de la projection de la structure cristalline, à condition que les phases des réflexions de rayons X soient toutes les mêmes.

L'appareil de Bragg de 1939, mis en service au laboratoire de Cambridge, a permis de produire des figures de diffraction à partir d'un masque représentant les données de diffraction de la diopside, de manière « reconnaissable » mais très perfectible.

Les trous ont été percés dans une fine plaque de cuivre ou de laiton, chaque trou correspondant à une réflexion dans le plan $h0l$, la taille des trous étant proportionnelle à $F(h0l)$ (voir Figure 43). La plaque est placée entre deux lentilles, avec une source de lumière monochromatique (lampe à mercure) dans la focale de la première lentille. L'image formée par l'autre lentille est photographiée (Figure 44) et correspond à la structure cristalline de la diopside.

²¹² (W. L. Bragg 1939; W. L. Bragg 1942).

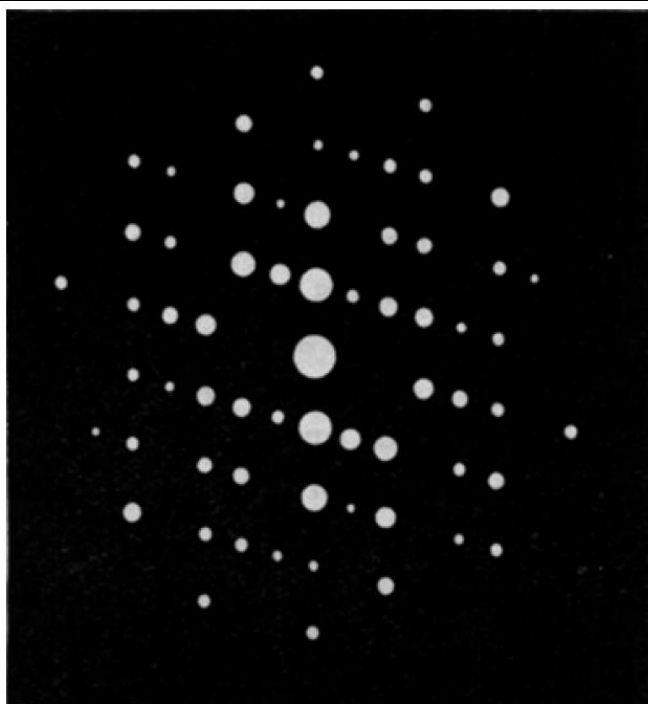


FIG. 2.

Figure 43 - Plaque utilisée dans le « X-ray Microscope » pour la diopside – 1939 – Source : (W. L. Bragg 1939, p. 678).

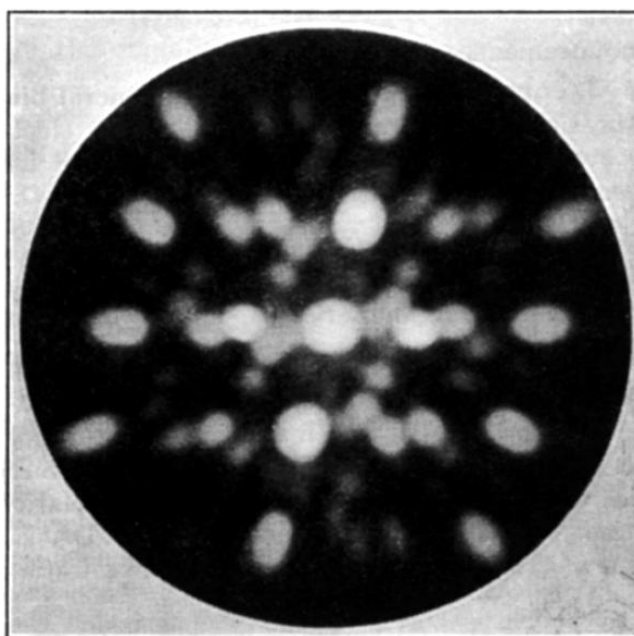


FIG. 3.

Figure 44 – Image de diopside obtenue par le « X-ray Microscope » de Bragg en 1939 – Source : (Ibid.).

L'élégance de la solution est assez unanimement partagée par les cristallographes, puisqu'il s'agit de produire une image par une imitation complète du processus de formation

d'une image dans un microscope, dans lequel des faisceaux de lumière assurent l'« intérim » des rayons X diffractés. La méthode permet un calcul analogique direct de la distribution de densité d'électrons dans le cristal partant des intensités mesurées sur les faisceaux de rayons X diffractés. Comme dans toute méthode directe, il est nécessaire que les ondes qui vont servir à former l'image, non seulement aient les bonnes intensités, mais aussi des rapports de phases corrects entre elles.

La solution ne coûte pas cher, c'est son avantage principal, pour un rendu très rapide. Mais le procédé de 1939 a des limites évidentes, liées à l'impossibilité de faire varier la taille des trous, donc de faire varier l'intensité de lumière, et l'impossibilité d'introduire des différences de phase. Plusieurs cristallographes attirés par la solution vont développer des formes perfectionnées de microscope. Un des plus ingénieux est Martin Julian Buerger (1903-1986)²¹³, qui travaille au laboratoire de Cristallographie du MIT²¹⁴. Il généralise le principe de Bragg, imagine un « microscope à deux longueurs d'onde »²¹⁵ en 1950. Le point très particulier sur lequel porte cette réalisation est un moyen de réintroduire des décalages de phases, précisément à l'endroit du microscope où se perdent les informations de phase, c'est-à-dire à la substitution des faisceaux. Il invente pour cela des « phase shifters » avec des fragments de mica à positionner dans le système (voir Figure 45).

²¹³ Cristallographe de renom, M.J. Buerger est plus connu pour l'invention de la « Chambre de précession pour rayons X » (1944) - (Azaroff 1986; Frondel 1988).

²¹⁴ L'autre groupe le plus actif est probablement celui de Henry Lipson, à l'Université de Manchester – voir (Dunkerley et Lipson 1955; Taylor, Hinde et Lipson 1951). B.T.M. Willis, autre instrumentiste de la cristallographie, travaillant à l'Atomic Energy Commission, a étendu le système à l'analyse de structures imparfaites, avec des réseaux optiques (Willis B. T. M. 1957a; Willis B. T. M. 1957b).

²¹⁵ (Buerger 1950).

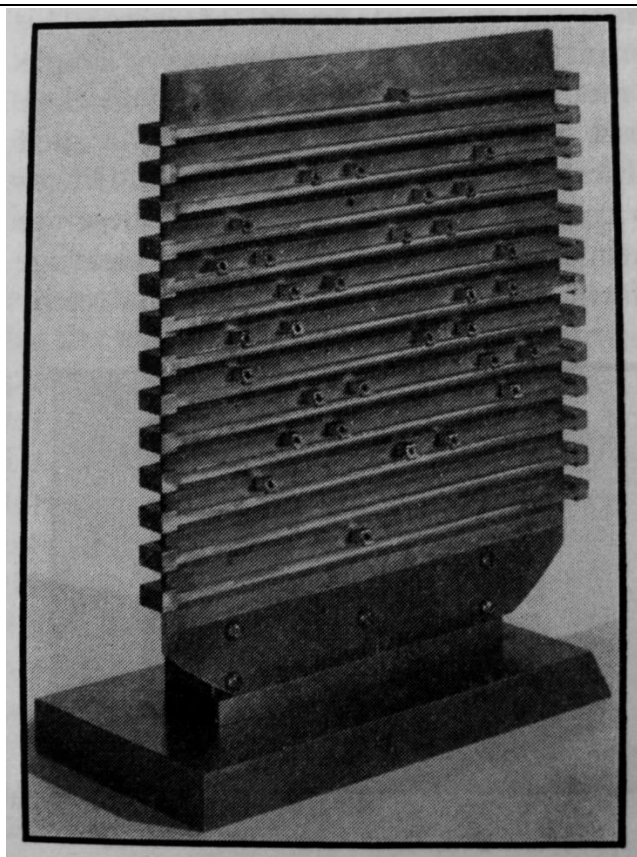


Figure 45 - Ensemble de « Phase-shifters » en mica – 1950 – Source : (Buerger 1950, p. 914).

Ces microscopes intègrent la panoplie des systèmes de transformées optiques de Fourier, dont le rapport aux aspects mathématiques ne fait aucun mystère :

If the object is periodic, then its diffraction image is in the form of a collection of discrete spectra.[...] the diffraction image is the weighted reciprocal lattice of the object. The diffraction image of this reciprocal lattice is the final image. To generalize this statement for non-periodic objects, one can restate it in the language of Fourier transform. The diffraction of the object is its Fourier transform. The diffraction of the diffraction image is therefore the transform of the transform of the object.²¹⁶

b) La caméra « Fly's eye »

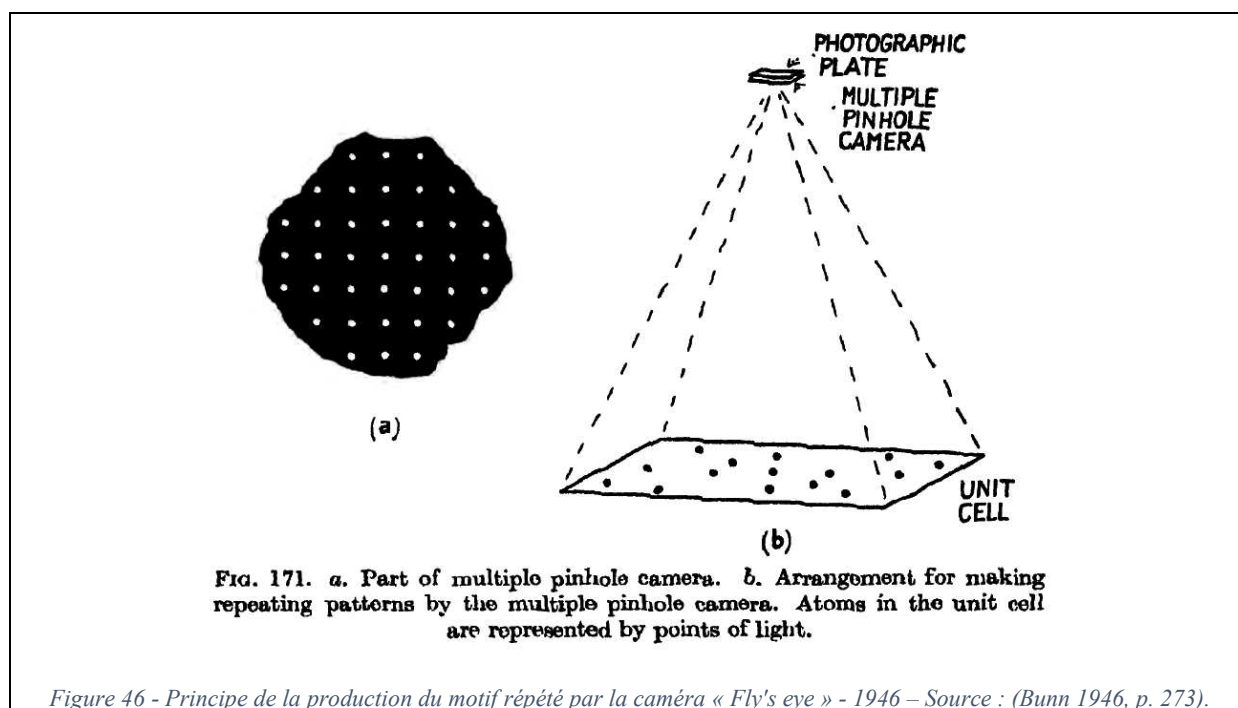
La méthode de la caméra « Fly's eye », initiée par W.L. Bragg au début des années 1940, compte parmi les méthodes indirectes dans lesquelles il s'agit de faire une conjecture sur la structure cristalline étudiée, pour faire les calculs de la figure de diffraction que cette structure hypothétique donnerait et la confronter aux résultats d'observation, pour évaluer l'hypothèse de départ et modifier la conjecture en conséquence.

Dans la méthode du « Fly's eye », il s'agit de fabriquer, à une échelle suffisamment petite pour produire des effets d'interférences optiques, un motif plan correspondant à la structure cristalline présumée, vue sous un angle particulier : c'est une sorte de modèle de la structure adapté à l'échelle de l'optique visible. Le motif de diffraction produit par une lumière monochromatique passant à travers cette imitation de cristal correspond au motif de diffraction par rayons X du cristal réel. C'est-à-dire que les intensités relatives des points de diffraction

²¹⁶ (*Ibid.*, p. 909).

lumineux correspondent aux points de diffraction de rayons X de la zone sélectionnée. C'est ce que W.L. Bragg, Alexander R. Stokes (1919-2003) et Charles W. Bunn (1905-1990) ont démontré et la manière dont ils ont élaboré les premiers systèmes²¹⁷.

La méthode se décompose en deux étapes : la réalisation préalable du modèle de la structure présumée, puis l'observation et l'enregistrement du résultat de la diffraction optique de ce motif. Le principal problème expérimental est celui de la fabrication du motif répété qui modélise la structure cristalline supposée. La méthode la plus simple, et la première utilisée par Bragg et Bunn, est de représenter les atomes d'une maille élémentaire par des points lumineux et de photographier cela avec une caméra dite « Fly's eye ». Le motif répété est fabriqué ainsi (Figure 46) : les atomes d'une cellule sont représentés par des trous dans un carton opaque, éclairés par l'arrière. Une photographie multiple de cette cellule est prise au moyen d'une caméra à trous d'épingle (Partie « a » sur la Figure 46) qui consiste en 676 trous, des sténopés arrangés régulièrement sur une surface de 5 mm par 5 mm : c'est ce qui est appelé proprement le « Fly's eye » par analogie avec l'œil de la mouche.



Cette forme très simple de caméra « Fly's eye » peut se réaliser photographiquement en dessinant, à grande échelle, un motif de points noirs sur un carton blanc, de grande taille, prise en photographie réduite, avec un grain très fin²¹⁸. La caméra « Fly's eye » est un moyen simple et rapide de construire le motif modèle. Alexander Stokes a modifié la caméra avec une lentille

²¹⁷ (W. L. Bragg 1944; W. L. Bragg et Stokes 1945; Bunn 1946).

²¹⁸ Les distances entre les trous illuminés et les trous d'épingle, et entre les trous d'épingle et la plaque photographique doivent être telles que les images soient bien contiguës, pour préserver les coordonnées de la cellule. Les atomes ayant des effets de diffractions différents peuvent être représentés par des trous de différentes tailles, ou si les trous ont tous la même taille, en recouvrant les trous représentant les atomes légers durant l'exposition. Une autre méthode pour fabriquer les motifs par le moyen d'une caméra à multiples trous est d'utiliser une petite source lumineuse individuelle photographiée dans différentes positions, chaque représentant la position d'un atome dans la cellule en projection. (Bunn 1946, p. 271-273).

« Perspex »²¹⁹ miniature pour la rendre plus performante²²⁰. La caméra simple avec des trous d'épingle est efficace pour des mailles contenant jusqu'à 50 atomes.

Une fois le motif réalisé, il est placé entre une source ponctuelle de lumière monochromatique et un télescope, à plusieurs mètres de distance. La figure de diffraction est observée en regardant à travers le télescope. Les intensités relatives des images perçues ainsi correspondent avec celles des réflexions de rayons X si la structure supposée est correcte²²¹.

Les photos montrent une partie du motif représentant un cristal de phthalocyanine (répété 676 fois - Figure 47) – ce cristal, bien connu en 1946, a été choisi pour faire la démonstration du principe. La Figure 48 montre la diffraction obtenue par voie optique, conforme aux mesures de diffractions de rayons X²²².

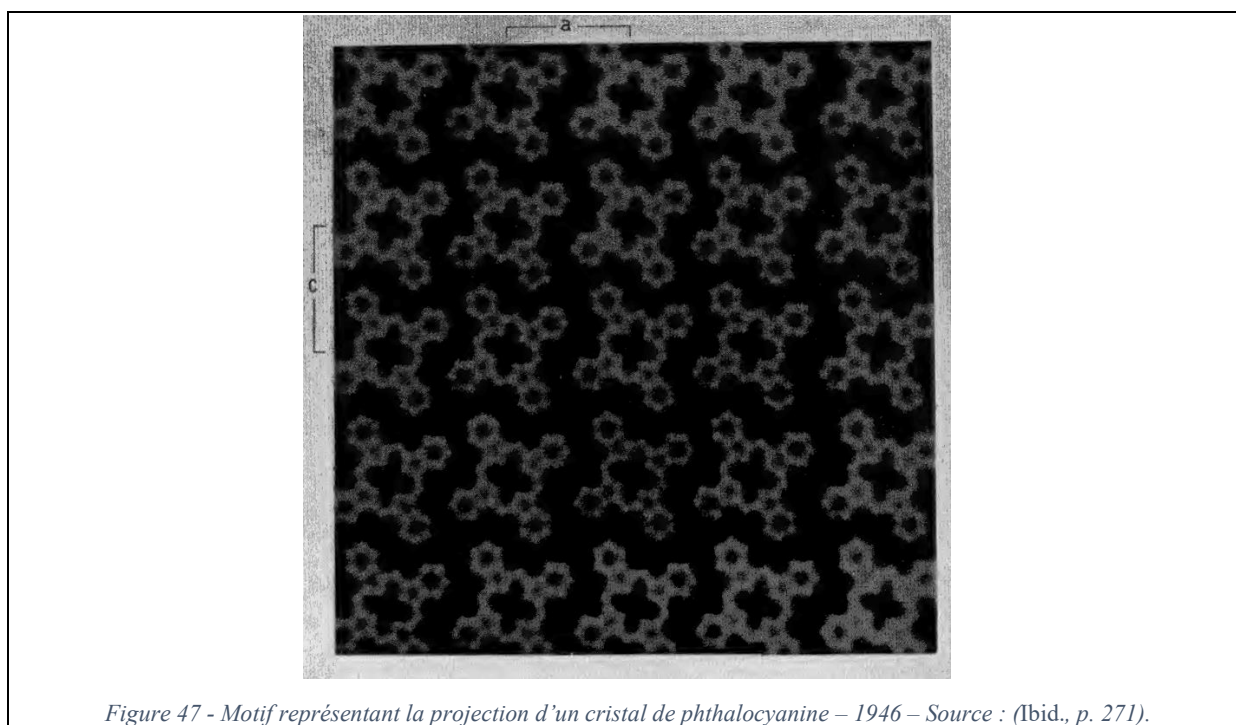


Figure 47 - Motif représentant la projection d'un cristal de phthalocyanine – 1946 – Source : (Ibid., p. 271).

²¹⁹ Du polyméthacrylate de méthyle.

²²⁰ (Stokes 1946).

²²¹ Il existe une méthode alternative pour observer les faisceaux diffractés grâce à une lentille qui produit une image d'une source ponctuelle monochromatique située à plusieurs mètres de distance. Le motif représentant la structure cristalline est placé entre la source et la lentille : l'opérateur examine la figure au moyen d'un microscope. La lentille peut même être intégrée directement dans le sous-étage d'un microscope. (Bunn 1952, p. 107).

²²² « [...] it can be seen that there is a close correspondence between the optical and X-ray intensities; there are some discrepancies among the weaker spots, but the agreement is on the whole very good—quite good enough to show that the method can be used for the purpose of finding approximate atomic positions. » (Bunn 1946, p. 272).

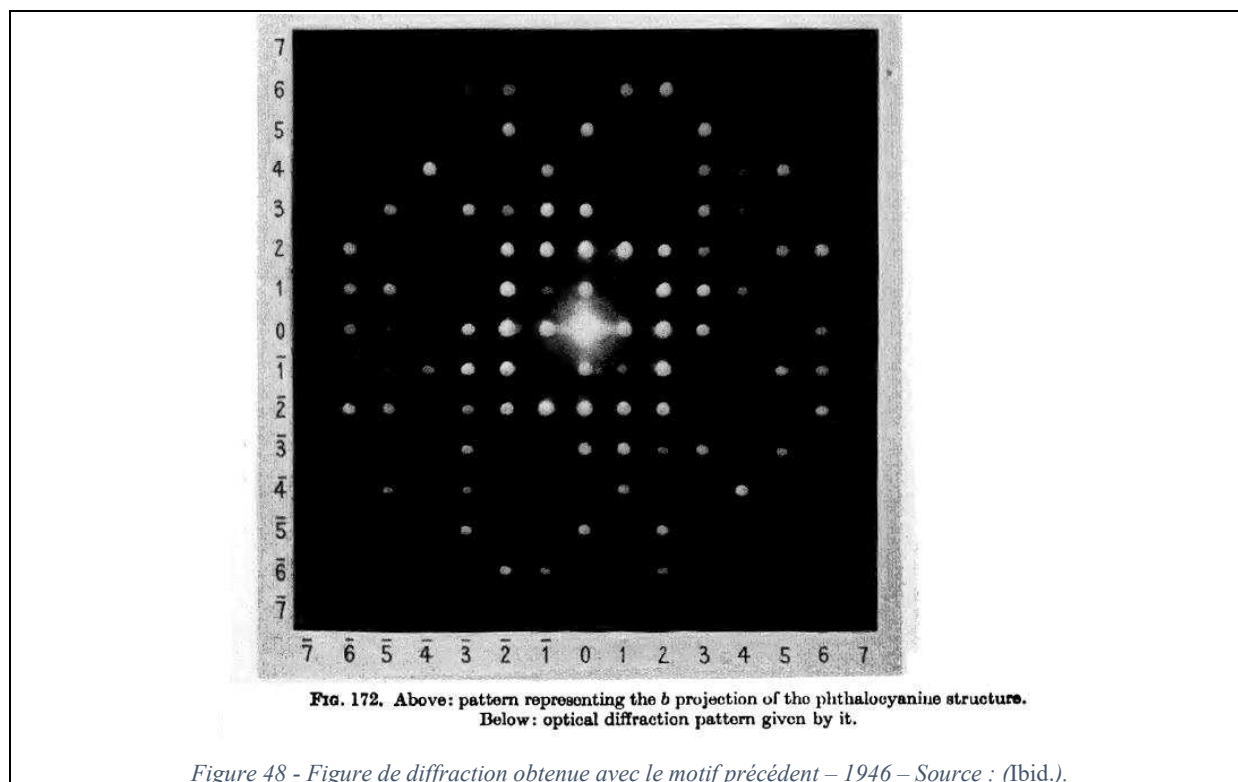


Figure 48 - Figure de diffraction obtenue avec le motif précédent – 1946 – Source : (Ibid.).

La méthode du « Fly's eye » a prouvé son utilité dans l'analyse de structures et a été utilisée intensivement dans les recherches prioritaires, durant la seconde guerre mondiale, pour la pénicilline²²³ - la caméra « Fly's eye » utilisée avait 656 trous de 0,2 mm de diamètre espacés de 0,2 mm, avec une longueur focale de 1mm. Sa simplicité, l'absence de pièces mobiles, sa robustesse et sa rapidité font tout l'intérêt de la méthode :

The value of the "fly's eye" method lies in its rapidity: using a sequential exposure method in which a simple small-filament lamp is placed at each atomic position in turn, it is possible to plot a set of atomic positions, make the exposures, process the plate wash it and dry in methanol and examine the diffraction pattern within one hour. To obtain similar information by calculation would take many hours....²²⁴

Le « Fly's eye » conserve une place à part dans les techniques d'analyse de structure. Il a les inconvénients des méthodes indirectes et optiques : la méthode ne donne que les intensités (les F^2), les phases doivent être déterminées par d'autres méthodes. L'information étant délivrée sous forme de tâches sur une plaque photographique, il faudrait des moyens photométriques pour donner des valeurs précises de ces intensités. Malgré les imprécisions, et tant que la méthode se limite à des déterminations heuristiques, les inconvénients n'handicapent pas l'usage intensif qui en est fait²²⁵.

2. Le X-RAC de Pepinsky

Raymond Pepinsky (1912-1993) est resté célèbre dans le domaine de la cristallographie pour sa conception du X-RAC (X-Ray Analog Computer), un instrument analogique dédié à l'analyse cristallographique. Financé par l'Office of Naval Research et le Auburn Research

²²³ (Crowfoot et al. 1949).

²²⁴ (Bunn 1952, p. 107).

²²⁵ Voir les exemples dans (W. L. Bragg et Stokes 1945; Taylor, Hinde et Lipson 1951; Hanson, Lipson et Taylor 1953).

Foundation, le projet est initié à l'Alabama Polytechnic Institute (Auburn University) en 1947, et mis en fonction en 1949 à l'Université PennState (Department of Physics) où Pepinsky s'installe pour quelques années²²⁶. Le dispositif réalise des synthèses de Fourier en deux dimensions, en quelques secondes, grâce à des circuits électroniques à tubes. Le résultat, sous forme de cartes de Patterson ou de cartes de densité électronique, est affiché sur un écran à tube cathodique.

Dans un contexte de compétition avec d'une part les calculs mécanographiques, d'autre part les projets de calculateurs électroniques digitaux (également financés par l'ONR), les objectifs de Pepinsky sont pluriels : réaliser un instrument dans lequel l'utilisateur entre directement les mesures de diffraction, insère et modifie les phases des composantes, et qui permet de visualiser le résultat très immédiatement sous forme de carte (vue d'ensemble du X-RAC sur la Figure 49 et Figure 50). L'instrument doit calculer très vite pour tester rapidement des structures et donc être au plus efficace dans le processus itératif d'analyse structurale.

Le tube cathodique est un organe essentiel dans le X-RAC, ce n'est pas seulement le dispositif de visualisation de la carte finale : le tube cathodique, avec des circuits électroniques adaptés de la télévision, est l'artefact qui réalise l'opération algébrique de synthèse des composantes de Fourier. Le système est une sorte d'analogie télévisuelle des masques de Bragg-Huggins : là où la pellicule photographique additionnait les composantes, ici le balayage du spot lumineux sur l'écran réalise l'opération d'addition, avec une précision qui dépasse très largement les systèmes optiques.

D'où vient l'idée d'adopter cette solution ? Pepinsky a été impliqué dans les recherches sur le radar durant la seconde guerre mondiale, au RadLab du MIT, c'est-à-dire le laboratoire le plus en pointe sur le radar. Pepinsky travaille très précisément sur les modes de visualisation des données radar sur des oscilloscopes, sujet qu'il poursuit en 1945 encore dans l'Alabama, lieu de conception initial du X-RAC. En lieu et place des données radar, Pepinsky veut afficher les résultats de synthèses de Fourier. Les composantes de Fourier sont préparées au préalable sous forme de signal de télévision²²⁷, avant d'être envoyées dans le tube cathodique.

L'écran est balayé par un spot lumineux à des vitesses très différentes en X (1000 Hz) et Y (1Hz) – à la manière d'un affichage de télévision. Un signal sinusoïdal module l'intensité du spot lumineux et produit un motif de franges sinusoïdales²²⁸. Différents signaux sinusoïdaux peuvent être additionnés et leur résultante contrôle l'intensité du spot. Les motifs correspondants sont affichés sur l'écran, instantanément et en une seule fois. L'écran peut être photographié pour garder la trace de la carte (voir Figure 52). Le X-RAC est donc composé de

²²⁶ Présenté comme projet à la Section Mathématiques de l'ONR, il est financé à partir de mai 1947.

²²⁷ Le développement de la télévision dans les années 1930 est orienté par la question de la conversion d'une image en signal électrique, sa transmission, puis sa reconversion en image sur un écran à tube cathodique. Pepinsky reprend très directement les travaux publiés dans le journal technique des Bell Labs en 1934 : « A Theory of Scanning and Its Relation to the Characteristics of the Transmitted Signal in Telephotography and Television » (P. Mertz et Gray 1934).

²²⁸ Il est essentiel que les fréquences des sinusoïdes se synchronisent avec la vitesse de balayage. Pepinsky y parvient en utilisant un signal de 1000Hz pour produire un champ tournant dans les stators de plusieurs moteurs (des « selsyns »). Si le rotor tourne exactement à 1, 2, etc. Hz, la fréquence de sortie est de 1000 +1 ou -1, ou +2 ou -2, etc. Hz, le signe dépendant du sens de rotation. Les rotors sont pilotés mécaniquement par des engrenages qui font que leur rotation est un nombre entier multiple de la fréquence de balayage des Y.

très nombreux circuits électroniques oscillants, à base de 4000 tubes électroniques (type triode), autant d'interrupteurs et de moteurs de synchronisations (voir l'arrière du X-RAC Figure 51).

L'opérateur entre les valeurs mesurées du facteur de structure F sur les compteurs des circuits oscillants. Le signe (positif ou négatif) de chaque composante dans la synthèse de Fourier est déterminé par la position d'un interrupteur à deux positions (voir Figure 50). La manière dont est conçu le X-RAC permet d'utiliser l'instrument pour expérimenter sur le modèle analogique : l'ensemble des circuits oscillants constituent un modèle électronique d'une somme trigonométrique de Fourier, expérimentable dans tous ses paramètres et coefficients, avec un retour direct sur écran. Puisque le signe de chaque composante n'est pas déterminé par les mesures de diffraction, il faut essayer, tâtonner, explorer et modifier les positions des interrupteurs pour voir l'effet sur l'écran²²⁹.

Le dispositif correspond très bien à l'usage cristallographique au début des années 1950. Il est utilisé comme instrument « tactique », dans les premiers temps des analyses de structures et comme un instrument interactif qui fournit une représentation graphique rapide²³⁰. Mais il n'a pas la précision des systèmes numériques, il est leur complémentaire. C'est un dispositif qui renvoie aux deux compromis récurrents qui se dessinent avec les instruments de calcul de Fourier : les systèmes analogiques rapides avec un mode de visualisation des résultats qui est très graphique et suggestif ; les systèmes numériques plus précis, mais coûteux et encore lents. La dichotomie se retrouve dans le domaine des calculateurs en général, mais ici le rendu graphique direct du X-RAC est un attribut essentiel et constitue un atout non négligeable des systèmes analogiques. De tous les systèmes analogiques pour la cristallographie, le X-RAC est de très loin le plus perfectionné et le plus important. La dichotomie a son pendant chez les utilisateurs, entre partisans de l'analogique et tenants des solutions numériquement précises : certains cristallographes sont enthousiastes d'autres plus réticents²³¹. Ces débats sont la toile de fond de la conférence de 1950 organisée par Pepinsky.

²²⁹ Pepinsky a complété ultérieurement le X-RAC par le S-Fac « Structure Factor analogue computer ». Il sert à calculer les coefficients de Fourier (amplitudes de structure) à partir de la donnée de coordonnées des atomes et des facteurs atomiques d'une structure qui sert d'hypothèse pour l'analyse structurale. (Ray Pepinsky 1952).

²³⁰ « tactical use in the early and intermediate stages of an investigation », selon les termes de Charles Bunn, cité dans (Agar 2006, p. 886).

²³¹ Autour de 1950, Dorothy Hodgkin privilégie les calculateurs numériques, en relation avec l'équipe de Linus Pauling à Caltech (et leur ordinateur SWAC). Max Perutz est lui « impressionné » par le X-RAC et les possibilités offertes (Chadarevian 2002, p. 116) : il utilise le X-RAC pour les calculs préliminaires sur la structure de l'hémoglobine (fonction de Patterson en 2D), dont les résultats complets paraîtront en 1954 avec la collaboration de W.L. Bragg (W. L. Bragg et Perutz 1954).



Figure 49 - Vue d'ensemble du X-RAC (Raymond Pepinsky au premier plan) – 1954 – Source : *Life Magazine* du 24 mai 1954²³²

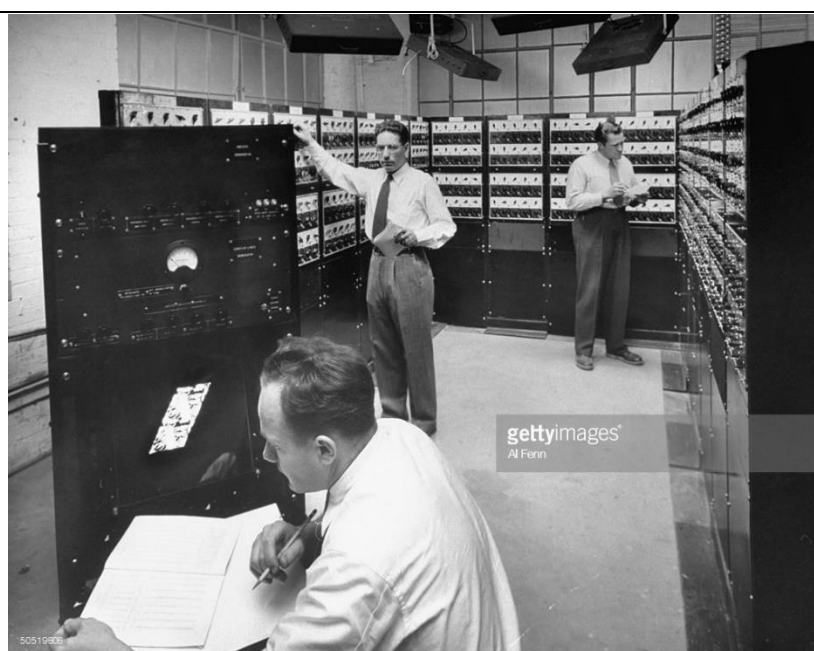


Figure 50 - Opérateur qui entre les données de diffraction sur les interrupteurs des circuits oscillants du X-RAC – 1954 – Source : *Life Magazine* du 24 mai 1954

²³² Preuve de l'impression donnée aux visiteurs de ce mastodonte du calcul, le magazine *Life* consacre plusieurs de ses pages (et photographies) dans son numéro du 24 mai 1954.



Figure 51 - Vue des circuits du X-RAC – 1954 – Source : Life Magazine du 24 mai 1954

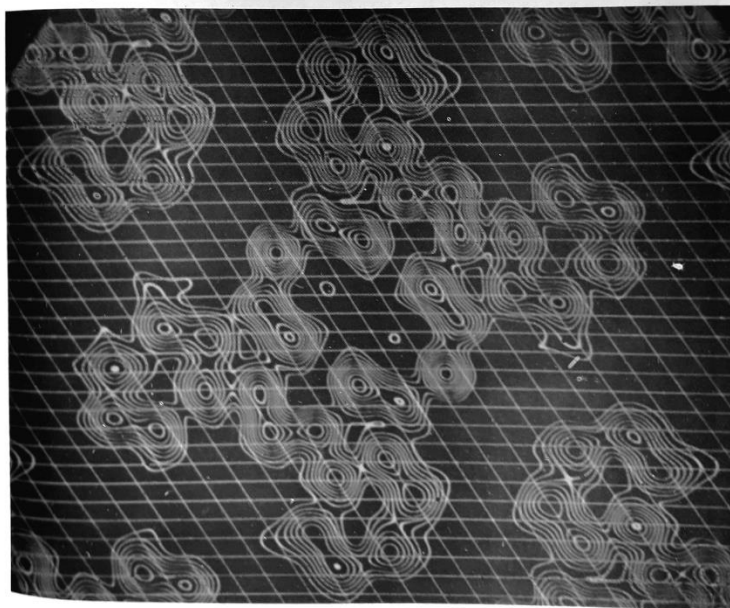


Figure 52 - Carte de densité de la Phtalocyanine obtenue sur X-RAC -1952 – Source : (Ray Pepinsky 1952, p. 234).

3. L'ordinateur, un nouvel instrument pour la cristallographie

L'instrumentation en cristallographie n'échappe pas à la vague des transformations électroniques, en particulier celles inspirées par les performances des calculateurs électroniques digitaux et de l'ordinateur après-guerre. La concurrence avec les systèmes analogiques, optiques et électroniques, est très animée vers 1950. Elle est en partie liée aux incertitudes technologiques et aux difficultés inhérentes aux calculs par les moyens électroniques. Dans un premier temps les cristallographes sont en fait très prudents, voire sceptiques, vis-à-vis de cette

technologie et adoptent tous les moyens à disposition sans distinction de principes. Étant donné les capacités des premiers ordinateurs, il faut tout de suite souligner qu'il n'y avait aucune nécessité à se ruier sur ces technologies : la mécanographie, bien installée, dépasse les capacités des ordinateurs et rivalise jusqu'au milieu des années 1950 au moins.

Néanmoins, certains cristallographes, et non des moindres, vont contribuer à l'effort de développement des méthodes de calcul cristallographique adaptées au calcul électronique digital. Leur participation est ponctuellement une forme de co-construction d'instruments du calcul cristallographique et de projets d'instruments génériques électroniques, si l'on s'en tient à la période pionnière et dans le contexte de quelques laboratoires au Royaume-Uni. Deux lieux principalement avec deux dynamiques très différentes : le Cambridge Mathematical Laboratory et le Birkbeck College (Londres). Le premier est le cadre du développement de l'EDSAC autour de Maurice Wilkes, à Cambridge, centre névralgique de la cristallographie ; le second témoigne des efforts d'instrumentation d'un acteur plus isolé, Andrew D. Booth. Ces deux lieux comptent parmi les quatre centres anglais où se développeront très tôt des ordinateurs, avec l'Université de Manchester et le National Physical Laboratory (NPL) à Teddington.

Pour caractériser cette période pionnière mêlant ordinateurs et cristallographie, citons d'abord un des acteurs principaux, Maurice Wilkes qui, dans ses mémoires, explique :

*X-ray crystallography illustrates very well the way in which new developments start under the umbrella of computer science, and later come to be viewed as computer applications pure and simple. At the time at which it was done, Kendrew's work was regarded as of great interest to all computer people.*²³³

Cette remarque de Wilkes nous renvoie au fait que l'ordinateur est inscrit dans un projet scientifique qui ne se limite pas à résoudre une question calculatoire désincarnée. Les protagonistes du développement de l'ordinateur élaborent des solutions dans leur versant matériel, dans les moyens de programmation des machines, tout en définissant les conditions et les limites de ces technologies. Mais la dichotomie entre spécialistes du calcul d'un côté, et cristallographe de l'autre, est le produit d'une lecture trop rétrospective de l'histoire. C'est dans une action collective que se construit une technologie de calcul à la mesure des exigences numériques des synthèses de Fourier en cristallographie.

a) Au Cambridge Mathematical Laboratory

Le Cambridge Mathematical Laboratory (CML) est un lieu crucial pour l'informatique naissante et le calcul cristallographique des années 1950. Il a été créé en 1937 sous l'impulsion du physico-chimiste John Lennard-Jones (1894-1954) pour fournir un service et des conseils pour le calcul scientifique au sein de l'Université de Cambridge²³⁴. L'équipement est à la pointe du moment, notamment avec des analyseurs différentiels, dont la construction avait même été entamée dès 1936 avec l'aide de Douglas Hartree, le meilleur spécialiste en Angleterre, et pour laquelle Maurice Wilkes a été embauché. Après-guerre, le CML est relancé avec de nouveaux objectifs de développement de machines et de méthodes numériques. À partir de 1945, il est dirigé par Maurice Wilkes qui monte une équipe pour le projet EDSAC. En toile de fond, il y a l'influence et l'impulsion données par Hartree et Comrie qui suivent les projets outre-Atlantique. Ils sont les meilleurs promoteurs de machines génériques et le rapport von Neumann

²³³ (Maurice Wilkes 1985, p. 192).

²³⁴ (M. Campbell-Kelly 1998; Croarken 1992).

sur l'EDVAC²³⁵ scelle cette perspective dans l'esprit de Wilkes. L'EDSAC, pour « Electronic Delay Storage Automatic Calculator », est un projet de calculateur électronique avec programme enregistré, dans lequel la mémoire sera un organe décisif.

La construction de l'EDSAC débute à l'automne 1947, les premiers calculs automatisés sont réalisés en 1949, et il sera opérationnel début 1950 pour les calculs intensifs. En juillet 1948, 19 personnes travaillent au CML. Parmi eux John Bennett et David Wheeler rejoignent le projet comme étudiants. Les utilisateurs du CML seront nombreux venant de l'astronomie, la physique nucléaire, les statistiques, l'ingénierie, etc. Mais parmi les premiers, les cristallographes ont les besoins les plus lourds et doivent réaliser les programmes les plus longs. Le défi est donc à la fois mathématique, calculatoire et technologique. L'instrument EDSAC doit être développé pour répondre à ce défi.

Reste que la rencontre entre le CML et les cristallographes n'est pas évidente. Elle se fait par l'intermédiaire de Bennett, ingénieur et mathématicien dans l'équipe de M. Wilkes. Bennett est un ami de Hugh Huxley (1924-2013), qui fait son doctorat sous la direction de Kendrew. Les calculs cristallographiques, des synthèses de Fourier pour des structures de protéines, sont potentiellement réalisables sur l'appareil en construction : c'est Bennett qui entreprend les premières programmations, suivi bientôt par Kendrew lui-même qui se prend au jeu et apprend à programmer l'EDSAC. Ils aboutissent en 1951 aux premiers résultats de fonctions de Patterson et synthèses de Fourier calculées par ordinateur en 2D et 3D, publiés en 1952 : « The computation of Fourier synthesis with a digital electronic calculating machine »²³⁶.

Dans ces travaux pionniers, il faut « tout » réinventer et adapter pour l'EDSAC, évidemment en s'inspirant des méthodes cristallographiques existantes. C'est la raison pour laquelle on retrouve une nouvelle fois les bandes de Lipson-Beevers, modèle de départ pour instrumenter l'EDSAC en vue de la cristallographie. Les bandes sont transposées, mais avec une double contrainte forte : le binaire est incontournable et la mémoire est très limitée. Les calculs de Fourier sont discrétisés selon le principe des bandes. Pour le calcul des fonctions trigonométriques sinus et cosinus, trois méthodes et trois approches sont testées :

- une routine qui calcule les résultats, à la demande ;
- une routine qui récupère les résultats mis en mémoire – ce qui nécessite de la place en mémoire, et les valeurs numériques des bandes ne sont pas adaptées à une machine qui opère en binaire ;
- une routine du type précédent mais avec adaptation des résultats sur des intervalles angulaires découpés en puissances de 2. Pour $2^5 = 32$ ce sont des intervalles $(90/32)^\circ$, ce qui n'est pas l'habitude cristallographique et ajoute des approximations aux résultats.

On saisit tout le poids des techniques préexistantes, qui indiquent une manière sûre de procéder, mais qui ne sont pas adaptées directement au binaire et en particulier au fonctionnement par puissances de 2 : les bandes ont institué en cristallographie une discrétisation universelle en 15 ou 30 morceaux donc en intervalles de $(90/15) = 6^\circ$ ou $(90/30) = 3^\circ$. En binaire, il faut transposer. Il faut ajouter à cela que l'EDSAC est une machine

²³⁵ Le célèbre « First Draft of a Report on the EDVAC » écrit par John von Neumann, est diffusé à partir de 1945, et établit les grandes lignes de l'architecture de nos ordinateurs modernes (EDVAC signifiant Electronic Discrete Variable Automatic Computer). (Ceruzzi 2003; Martin Campbell-Kelly et al. 2014).

²³⁶ (J. M. Bennett et Kendrew 1952).

expérimentale, avec des temps de fonctionnement « sans panne » réduits, et une exigence de programmation rigoureuse absolue. Dernier point à prendre en compte dans le système : il est possible d'imprimer les résultats, en utilisant le téléimprimeur de l'EDSAC, sous forme de tableaux de chiffres, mais tout ceci est évidemment sans comparaison avec les performances graphiques du X-RAC par exemple. Les méthodes de calcul de Fourier sont donc repensées pour les contraintes de la machine, qui est elle-même perfectionnée pour répondre aux exigences et spécificités de la cristallographie. Il s'agit, sur ces aspects, d'une co-construction d'un instrument orienté par le défi des méthodes cristallographiques, qui nécessite des nouvelles méthodes numériques et une nouvelle analyse numérique. Comme le dit Wilkes, il ne s'agit en rien d'une application d'un instrument déjà tout prêt pour le groupe de Perutz et Kendrew.

Les rapports de proximité entre les développements pionniers des ordinateurs et les synthèses de Fourier pour la cristallographie restent une exception. Au CML c'est l'affaire de personnalités avec des visions partagées sur le calcul scientifique, investies dans un projet commun. Durant la guerre Kendrew a travaillé sur le radar et la recherche opérationnelle, sur des moyens électroniques du traitement des données en quantité : c'est une des raisons qui explique son appétit pour les premiers ordinateurs, qui offrent un nouvel horizon en termes de traitement de données et qui fixent en quelque sorte une perspective à la cristallographie en train de devenir elle-même une science de traitement d'information massive.

En revanche, du côté du NPL, par exemple, les moyens de calcul ont servi pendant la guerre pour la cristallographie de la pénicilline, mais après-guerre aucun programme n'est prioritairement affiché au NPL sur la cristallographie. Le Pilot ACE, projet pionnier phare du NPL, ne servira aucun programme de recherche en cristallographie.

Le groupe de Cox à l'Université de Leeds, qui a une excellente réputation en calcul mécanographique, prend à la fois le chemin de la collaboration industrielle avec le constructeur BTM et fait ses premiers pas vers les ordinateurs à Cambridge et Manchester. L'ingénieur et mathématicien Durward W. Cruickshank (1924-2007)²³⁷, du groupe de Cox, est envoyé un temps à Cambridge pour l'EDSAC, puis à Manchester en 1952 pour s'attacher la collaboration de l'Université et du fabricant Ferranti de l'ordinateur Mark I.

Outre-Atlantique, du côté de Linus Pauling à l'Université de Californie, les ordinateurs sont mis au service du groupe de cristallographie : la machine SWAC « Standards Western Automatic Computer » développée au National Bureau of Standards en 1950 est transférée et utilisée à UCLA de 1954 à 1967. Par rapport au contexte britannique, la principale différence est finalement celle des moyens considérables aux États-Unis en matière d'ordinateurs. SWAC est mis à disposition pour le groupe et il sert plus largement les chercheurs du monde entier : Dorothy Hodgkin viendra d'Oxford réaliser ses calculs structuraux sur la vitamine B12 en 1955. Il faut dire que la puissance de calcul laisse rêveur : si une machine mécanographique est capable de traiter l'équivalent de 10 000 bandes de Lipson-Beevers par jour, le Ferranti Mark I en traite 100 000 et le SWAC, 1 million²³⁸.

²³⁷ (Cruickshank 2000; Ahmed et Cruickshank 1953).

²³⁸ (Agar 2006, p. 888).

b) *Andrew Booth : de la cristallographie aux premiers ordinateurs –
Birkbeck College - Londres*

C'est finalement dans un tout autre contexte, avec de petits moyens humains, financiers et matériels qu'Andrew Booth développe des ordinateurs de petite taille : au Birkbeck College (University of London). Booth est tout à la fois un excellent mathématicien, un cristallographe et un inventeur, ingénieur, capable d'assembler des systèmes de tubes et relais pour faire des calculateurs.

Booth a fait ses travaux de thèse en cristallographie à Birmingham, en 1944. Recruté par le très influent cristallographe John D. Bernal (1901-1971), il va poursuivre ses recherches à Londres. Bernal est un des pivots de la communauté des biologistes et cristallographes en Grande-Bretagne : élève de W.H. Bragg à Cambridge, il a collaboré et suivi les travaux de thèse de Dorothy Crowfoot, Rosalind Franklin (qui viendra à Birkbeck College à partir de 1953, après ses travaux sur l'ADN) ou encore Max Perutz. Établi à Birkbeck après la guerre il entend y installer une recherche en biologie moléculaire et cristallographie de pointe.

Booth développe pour Bernal des systèmes de calcul de Fourier, d'abord sur des principes mécaniques et analogiques, avant un premier dispositif électromécanique l'Automatic Relay Calculator (ARC). En 1946-47, il passe 6 mois aux États-Unis, rencontre von Neumann, et revient à Londres avec la ferme intention de développer des calculateurs électroniques selon les principes de von Neumann. Entre temps paraît son ouvrage de 1948 : *Fourier technique in X-ray organic structure analysis*²³⁹. Dans le paysage de la conception tous azimuts et très empirique d'instruments de Fourier, c'est une contribution forte et structurante : il y décrit la conception de nombreux systèmes de Fourier, il établit l'analyse numérique la plus aboutie du moment sur les synthèses de Fourier. Il dresse un tour d'horizon très complet des systèmes existants, avec leurs limites et les perspectives de développement.

En 1949, dans la continuité des recherches sur les instruments, l'analyse numérique et les principes de von Neumann, Booth va concevoir la deuxième version de son ARC, une machine entièrement électronique, rebaptisée Simple Electronic Computer (SEC). Puis, dans la foulée, il conçoit son ordinateur le plus connu, All-Purpose Electronic Computers (APEC), fabriqué en 1951. Booth se place sur un créneau de « petites » machines, principalement à usage de laboratoires universitaires : le SEC comptait environ 230 tubes, l'APEC un peu plus de 400. Rien à voir avec les mastodontes à milliers de tubes comme SWAC ou EDSAC.

Booth invente néanmoins des systèmes électroniques qui seront repris dans les machines commerciales : un système de mémoire « drum store » et un système de multiplicateur²⁴⁰. La conception de l'APEC servira également de base pour des machines commerciales de la compagnie BTM (le Hollerith Electronic Computer). La principale machine APEC sera celle de Birkbeck College dédiée au calcul cristallographique, appelée APE(X)C (Figure 53). Cinq autres modèles seront vendus, pour d'autres usages²⁴¹.

²³⁹ (A. D. Booth 1948).

²⁴⁰ (Johnson 2010).

²⁴¹ Par exemple, l'APE(N)C est vendue au Board of Mathematical Machines (Oslo, Norvège), l'APE(H)C à BTM, l'UCC est installée à l'University College (Londres). (Andrew D. Booth et Booth 1956, p. 19).

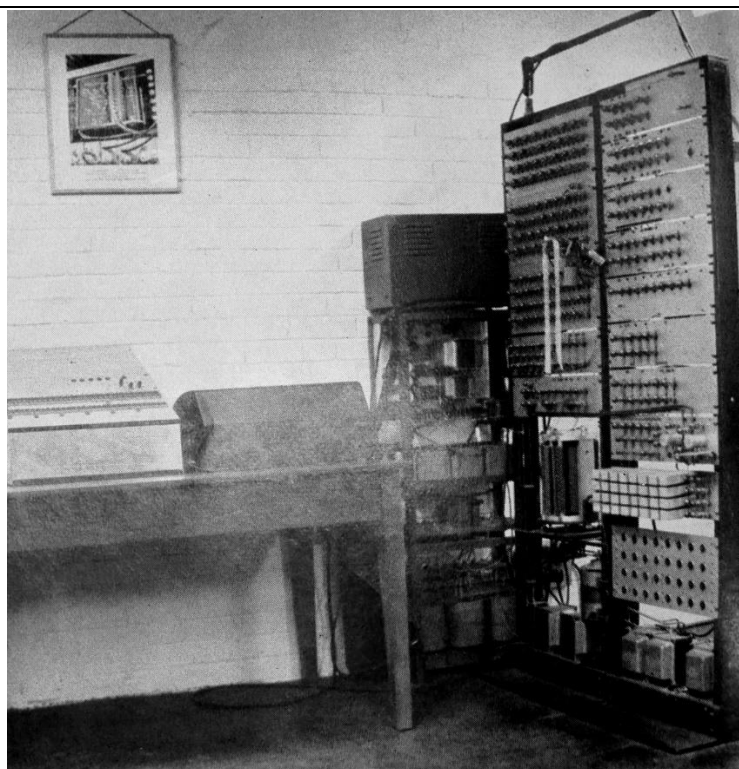


Figure 53 - Photographie de l'APE(X)C de Birkbeck College – 1956 – Source : Frontispice de l'ouvrage (Andrew D. Booth et Booth 1956).

Dans cette période pionnière du développement des ordinateurs, plusieurs projets sont des co-constructions au carrefour de l'électronique, du calcul, des mathématiques et de l'instrumentation cristallographique, assez opportunistes, et qui s'inscrivent dans des débats animés sur le type d'instruments de calcul pertinent au regard de la recherche cristallographique. Ainsi Bennett et Kendrew, tout en développant leurs recherches sur l'EDSAC écrivent en 1952 :

At the present stage it does not seem possible to assess the relative values for crystallographic purposes of general-purpose digital machines, such as the EDSAC, and of special-purpose analogue machines [Pepinsky X-RAC] ... though it would appear to us that some crystallographic problems may be more economically tackled by the one and some by the other type. Digital machines have the great advantages of accuracy (which is becoming increasingly important in crystallography), and of versatility, which enables the capital cost and running expenses of a general-purpose digital machine to be shared among a number of users with very different problems to solve. On the other hand, analogue machines such as the Pepinsky machine may have special advantages for some crystallographic problems.²⁴²

Le même Kendrew, en 1962, dans son discours de réception du Prix Nobel de Chimie, expliquera que la détermination de la structure de la myoglobine et hémoglobine, qui lui vaut ce prix avec Max Perutz aurait été impossible sans les moyens des ordinateurs, développés sans discontinuer depuis l'EDSAC à Cambridge. Les circonstances qui prévalaient dans la période pionnière ont malgré tout changé très rapidement, car l'ordinateur devient un instrument générique. Le rapport à la cristallographie évolue vers une forme de service informatique, mais le développement de programmes et de logiciels spécifiques reste en grande partie la maîtrise

²⁴² (J. M. Bennett et Kendrew 1952, p. 116).

des cristallographes. Garder la main sur la programmation et le processus informatique est un élément que Kendrew souligne à plusieurs reprises :

*In general, in our crystallographic work, it is most satisfactory for the crystallographer to do his programming, since he is probably developing methods as he goes along, and he alone understands precisely the problem needing solution; besides, crystallographers usually have adequate training in mathematics and take to programming very rapidly.*²⁴³

Pour donner un aperçu encore plus complet de la complexité des rapports entre mathématiques et instrumentation cristallographique, nous allons détailler l'épisode particulièrement saisissant de l'élucidation de la structure de l'ADN par les moyens cristallographiques, publiée en 1953.

F. La transformée de Fourier de l'ADN

L'histoire de la découverte de la structure en double hélice de la molécule d'ADN a été écrite selon plusieurs angles. Le célèbre cliché 51 obtenu par Rosalind Franklin en 1952 est le point focal de ces histoires. Il incarne tout à la fois la dextérité de la praticienne dans la cristallographie de rayons X, la qualité unique d'un cliché qui parachève plusieurs années de travail, et le scandale scientifique : dans le dos de Franklin, Crick et Watson ont eu accès à ce cliché, moment épiphanique pour ce duo qui aboutira le premier à un modèle en double-hélice de la structure de l'ADN et à sa publication dans *Nature* en avril 1953.

Mais le chemin qui va du cliché à la structure n'est pas une simple série de mesures et de déductions. Le cheminement vers la double hélice met en jeu des modèles moléculaires, des hypothèses sur la géométrie de la molécule, des clichés de diffraction par rayons X de molécules d'ADN et donc un processus de Fourier et ses calculs afférents. Dans les travaux de Watson et Crick le recours aux mathématiques de Fourier et aux modèles moléculaires s'ajoute aux savoir-faire de la cristallographie, installée de longue date dans l'Angleterre des années 1950. Impossible en effet de comprendre ces travaux sans les resituer dans leur contexte, le Cavendish Laboratory à Cambridge, placé sous le patronage de W. L. Bragg, J.M. Robertson et M. Perutz. Watson et Crick collaborent avec les cristallographes les plus reconnus, dont William Cochran, qui a été un élève de Beevers et arrive en 1951 au Cavendish. Crick fait sa thèse sous la direction de Max Perutz.

La base mathématique de l'étude cristallographique des molécules en hélice constitue une étape décisive et préalable à la découverte de 1953. En 1952, William Cochran, Francis Crick et Vladimir Vand publient dans la revue *Acta Crystallographica* leur article : « The transform of atoms on a helix »²⁴⁴. V. Vand, même s'il ne fait qu'un bref passage à Cambridge, est le premier instigateur des calculs de transformée de Fourier de structures en hélice. Il est d'ailleurs celui qui restera le plus attaché aux méthodes de calcul pour la cristallographie durant toute sa carrière²⁴⁵. Cochran, Crick et Vand déterminent les transformées de Fourier de plusieurs structures modèles en hélice partant du cas le plus simple d'une hélice uniforme : des atomes répartis régulièrement sur un fil imaginaire en hélice, sans fin, de rayon r . Le calcul général de la transformée $T(\xi, \eta, \zeta)$ est une gageure, mais en intégrant toute la géométrie en

²⁴³ Cité dans (Agar 2006, p. 888).

²⁴⁴ (Cochran, Crick et Vand 1952).

²⁴⁵ Voir les quelques mots sur les machines de Vand, page 143. (Solcova et Krízek 2011).

hélice dans la formule (Figure 54) il est possible d'aller au bout du calcul et à des résultats numériques approchés.

2. The transform of a uniform helix

We calculate first the Fourier transform (or continuous structure factor) of a uniform helix (for instance, a wire of infinitesimal thickness) of infinite length, radius r and axial spacing P . If the helix is defined by the equations

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos (2\pi z/P) , \\ y &= r \sin (2\pi z/P) , \\ z &= z , \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(see Fig. 1), the value of the Fourier transform at a point (ξ, η, ζ) in Fourier (reciprocal) space is given by

$$T(\xi, \eta, \zeta) = \int \exp [2\pi i(x\xi + y\eta + z\zeta)] dV ,$$

$$\begin{aligned} T(R, \psi, \zeta) \\ = \int_0^P \exp \left[2\pi i \left\{ Rr \cos \left(2\pi \frac{z}{P} - \psi \right) + z\zeta \right\} \right] dz , \end{aligned} \quad (2)$$

where $R^2 = \xi^2 + \eta^2$ and $\tan \psi = \eta/\xi$.

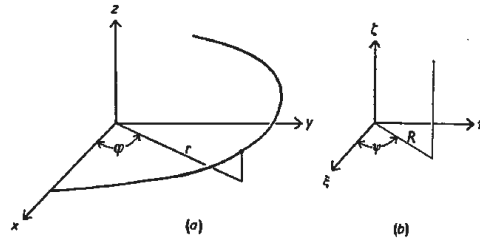


Fig. 1. (a) Cartesian (x, y, z) and cylindrical-polar (r, φ, z) coordinates of a point on a helix. (b) Corresponding coordinates of a point in reciprocal space.

Figure 54 - Extraits de la publication de 1952 « Transform of a helix » - Source : (Cochran, Crick et Vand 1952, p. 582).

The result is

$$T(R, \psi, n/P) = J_n(2\pi Rr) \exp [in(\psi + \frac{1}{2}\pi)] , \quad (3)$$

where J_n denotes the n th-order Bessel function.

Figure 55 - Formule de la transformée de Fourier d'une hélice simple - Source : (Ibid.).

La reformulation de T conduit à une expression (Figure 55) à base de fonctions de Bessel J_n , dont les valeurs se trouvent dans des tables numériques classiques, représentées dans l'article sous une forme plus graphique (Figure 56).

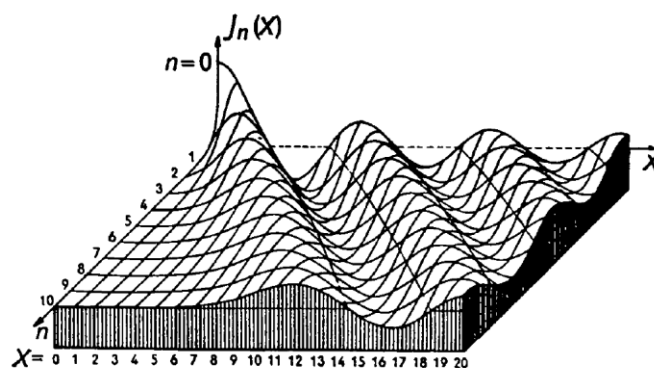


Fig. 2. Illustration of Bessel functions. (Reproduced by kind permission of the publishers from *Tables of Functions* by Jahnke & Emde. New York: Dover Publications.)

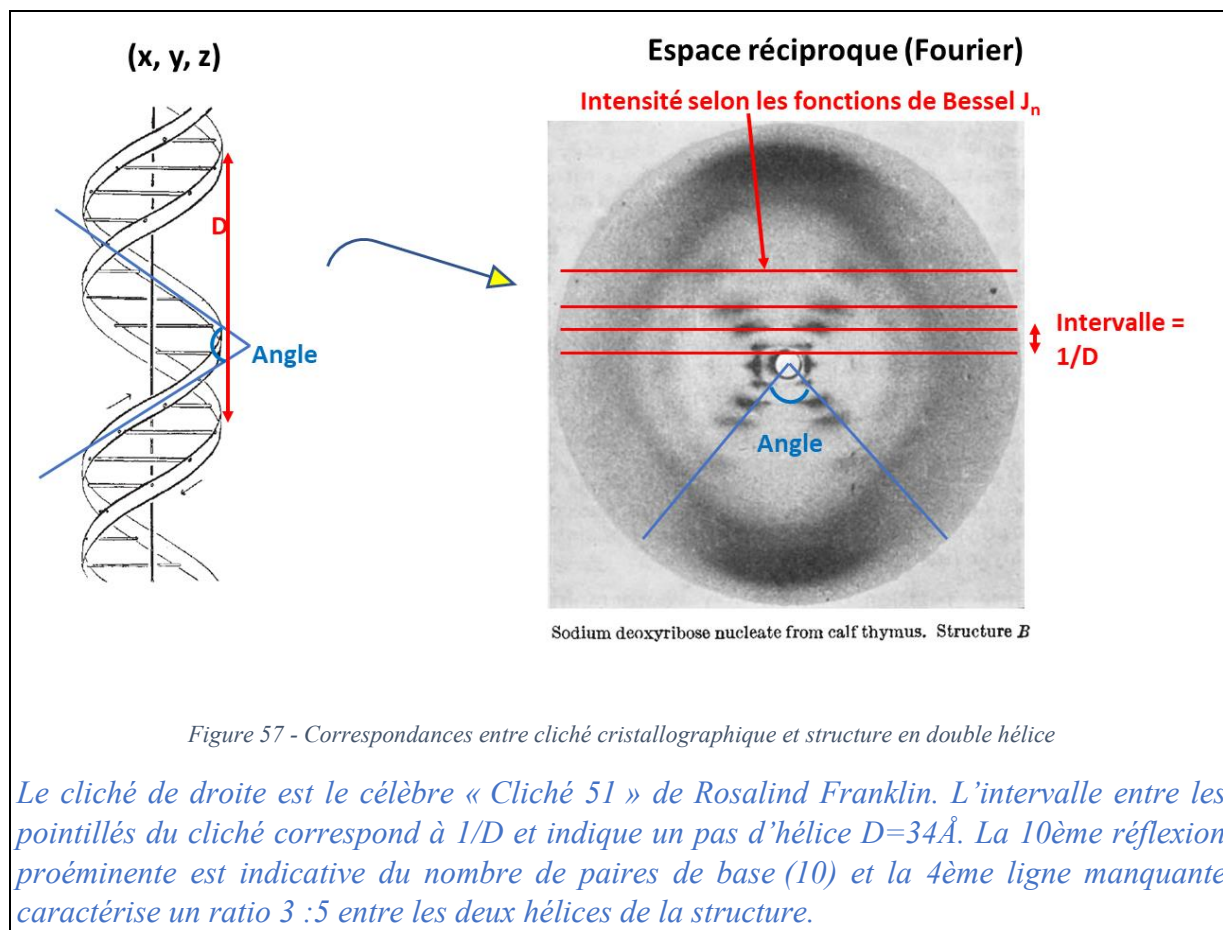
Figure 56 - Représentation graphique des fonctions de Bessel J_n - Source : (Ibid.).

Le tout est une préparation à l'interprétation de résultats expérimentaux. Dans ces opérations s'entremêlent les contraintes de la géométrie, du calcul effectif et de l'objectif cristallographique. Cochran et Crick tirent les premières conséquences théoriques de ces résultats, liant clichés cristallographiques et structures en hélice de Pauling-Corey dans leur publication parallèle en 1952, dans la revue *Nature*²⁴⁶.

Le cliché de Franklin est « découvert » à ce moment précis, accélérant le processus d'interprétations de Watson et Crick. La livraison de *Nature* d'avril 1953 rassemble les principaux protagonistes de cette découverte et leurs perspectives, en trois articles : « Molecular structure of nucleic acids : A structure for DNA » (J. Watson et F. Crick), « Molecular structure of Deoxypentose Nucleic Acids » (M. Wilkins, A. Stokes, H. Wilson) et « Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate » (R. Franklin et R. Gosling).

En 1953, tous les éléments clés de l'interprétation en double hélice sont rassemblés. Le cliché permet de déterminer les caractéristiques de l'hélice : le pas de l'hélice, le diamètre de l'hélice, les distances entre paires de base. L'absence de la quatrième ligne de « pointillés » sur le cliché, signe d'une interférence destructrice, est interprétée par Watson et Crick comme la superposition de deux hélices décalées (voir Figure 57).

²⁴⁶ (Cochran et Crick 1952).



Etant décédée prématurément en 1958, R. Franklin n'a pas été honorée du prix Nobel en 1962, alors que son cliché 51 a été absolument décisif. Au-delà de la performance cristallographique, il est intéressant de resituer la démarche de Franklin. Celle-ci s'inscrit dans une analyse cristallographique très orthodoxe, passant par les calculs de fonctions de Patterson à partir des clichés. Si Watson et Crick s'appuient évidemment sur les résultats obtenus par ces moyens qu'ils pratiquent beaucoup moins que Franklin, ils empruntent un chemin détourné par le calcul de transformées de Fourier en combinaison avec des modèles moléculaires, procédant par tâtonnements et essais-erreurs. Au bout de la démarche de Franklin, il pouvait y avoir une forme d'assurance de parvenir à élucider la structure par des cartes de densité électronique, selon une méthode ayant fait ses preuves. La démarche de Watson et Crick, un peu plus empirique et opportuniste, renouant presque avec des pratiques d'essais-erreurs des années 1930, a abouti beaucoup plus rapidement.

G. Qu'est-ce que le calcul cristallographique après 1960 ?

Jusqu'ici nous avons indiqué les modalités diverses du calcul cristallographique des années 1930 aux années 1950, comment évoluent-elles après 1960 ? Pour donner une idée des perspectives qui se dessinent jusqu'aux années 1970, nous avons sondé les conférences internationales sur le sujet, retenant deux d'entre elles, qui s'inscrivent dans la lignée de la toute première organisée en Pennsylvanie en 1950 :

- la conférence de Glasgow (Ecosse) en août 1960, coorganisée par Ray Pepinsky, John M. Robertson et James C. Speakman²⁴⁷.

- l'école d'été et conférence d'Ottawa (Canada) en août 1969, organisées par la commission de calcul cristallographique de l'International Union of Crystallography²⁴⁸.

La conférence de 1960 réunit 114 participants, signe de l'ampleur que ce sujet très technique est en train de prendre. Pour donner la tonalité de cette conférence, Pepinsky écrit : « The lapse of ten years has now seen revolutionary developments in electronic, digital computers and in their applications to crystallography »²⁴⁹. Lui qui était le tenant infatigable des solutions analogiques et qui présente les derniers perfectionnements du X-RAC en 1960, se rallie au constat général et à la solution digitale qui devient la plus partagée. Non que les solutions mécaniques, optiques, analogiques soient remises, mais elles sont très concurrencées, systématiquement comparées aux solutions numériques. La recherche de nouveaux instruments pour le calcul cristallographique s'infléchit en 1960 très clairement vers le digital. L'artefact du calcul cristallographique est de plus en plus un ordinateur. Il est manifeste dans les exposés de cette conférence que c'est bien le centre d'intérêt et le sujet de discussion majeurs : comment programmer les calculateurs électroniques digitaux pour la cristallographie ? Les deux tiers des exposés sont des retours d'expériences sur les programmes déjà mis en œuvre dans les ordinateurs. Deux aspects ressortent de ces contributions : il existe une grande homogénéité des fonctions programmées sur les ordinateurs, mais une grande diversité de machines sur lesquelles ces fonctions sont testées. En clair, trois calculs cristallographiques sont installés : le calcul des synthèses de Fourier, la détermination des facteurs de structures, et des programmes d'aide à la représentation des géométries moléculaires. La continuité avec l'histoire de la cristallographie est évidente et elle s'incarne encore mieux dans ce constat : les bandes de Lipson-Beevers ne sont plus mentionnées que comme un modèle pour simplifier les synthèses de Fourier, mis sous forme d'algorithmes pour les ordinateurs. D'une certaine façon les « bandes » de Lipson-Beevers sont devenues la « méthode » de Lipson-Beevers.

En inventoriant les réalisations informatiques, ces dernières semblent refléter l'ensemble des types d'ordinateurs existants en 1960 : des machines issues de la mécanographie²⁵⁰ comme l'IBM 604, des systèmes génériques commercialisés²⁵¹ à grande échelle depuis quelques années comme les IBM 650 et IBM 704, des ordinateurs très récents²⁵²

²⁴⁷ Elle porte strictement le même intitulé que la première « Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis » et les actes ont été publiés l'année suivante : (Ray Pepinsky, Robertson et Speakman (eds.) 1961).

²⁴⁸ Intitulée « Crystallographic computing » (Ahmed, Hall et Huber (eds.) 1970).

²⁴⁹ (Ray Pepinsky, Robertson et Speakman (eds.) 1961, p. v).

²⁵⁰ L'IBM 604 est une machine mécanographique avec un panneau de programmation électronique, produite depuis 1948.

²⁵¹ L'IBM 650 est le premier ordinateur générique commercialisé en 1954 après les ordinateurs plus orientés pour le calcul scientifique IBM701 (1952) et IBM704 (1954). Le 650 est le plus fréquemment mentionné dans les projets cristallographiques des années 1950, vu au travers de l'échantillon que constitue cette conférence.

²⁵² Successeur de l'IBM 704, installé pour la première fois en 1958, l'IBM 709 est le plus avancé des ordinateurs scientifiques de la marque IBM à ce moment-là.

comme l'IBM 709, le Ferranti Pegasus²⁵³, l'EDSAC II à Cambridge, le DEUCE²⁵⁴ produit par English Electric Ltd et des projets très avancés technologiquement, mais encore en plein développement, comme le Ferranti Muse à l'Université de Manchester²⁵⁵. On remarquera aussi que les machines sont essentiellement soit britanniques, soit américaines, et qu'elles se distinguent entre ces deux origines sur un paramètre surtout : leur taille, ou leur puissance de calcul si on préfère. Les principaux centres de recherche en calcul cristallographique se répartissent entre ces deux pays pour l'essentiel et les moyens calculatoires aux États-Unis sont toujours supérieurs²⁵⁶.

La situation évolue considérablement sur la décennie 1960. En 1969 au cours du colloque qui réunit 170 participants, le paysage est très différent. Le ratio entre les présentations de réalisations de systèmes et celles sur les méthodes est inversé : les deux tiers sont des contributions théoriques et méthodologiques. En termes d'instrumentation pour le calcul cristallographique, les sujets sont redistribués sur trois thématiques : les « Crystallographic computer systems », les « Crystallographic data structures » et les « Programs for computer-controlled diffractometers ». La cristallographie repose désormais sur des ensembles informatiques, des systèmes complets qui contrôlent les diffractomètres, stockent et gèrent la grande quantité de données générées, calculent et permettent la visualisation des structures cristallines. Ces systèmes sont des chaînes instrumentales complexes, avec un couplage entre l'ordinateur et les diffractomètres automatisés. Toute l'instrumentation est conçue pour produire des données directement exploitables numériquement.

La mise en place de ces systèmes a connu en fait deux temps. Les premiers diffractomètres automatiques sont inventés par Ulli Arndt, développés entre 1957 et 1960 au sein de la Royal Institution (Londres) puis commercialement, sous licence, par Hilger et Watts²⁵⁷. Ces diffractomètres remplacent les techniques photographiques. Les données sont recueillies par la mesure des intensités de rayons X. Le diffractomètre Arndt incorpore un calculateur analogique, un système mécanique qui permet d'orienter le cristal à analyser et de faciliter les opérations qui, en ce sens, sont automatisées. C'est l'utilisation d'un densitomètre pour la mesure des intensités, relié directement à un ordinateur, qui achève le second temps de l'automatisation. Les années 1960 sont encore une période de transition, parce que les plaques photographiques sont restées utiles dans les cas complexes et que les ordinateurs sont accessibles seulement à quelques groupes de chercheurs.

²⁵³ Ordinateur anglais produit par la firme Ferranti sur une très courte période 1954-56. C'est le groupe de l'Université de Leeds, autour de Cox et Cruickshank qui dirige les travaux cristallographiques sur cet ordinateur. Voir note 237.

²⁵⁴ Le DEUCE est conçu sur le modèle du Pilot ACE du National Physical Laboratory, vendu à partir de 1955. C'est l'équipe de l'Université d'Oxford qui utilise ce type d'ordinateur.

²⁵⁵ Le projet Muse a débuté en 1956 à l'Université de Manchester, mais son aboutissement véritable est le supercalculateur Atlas, livré en 1962, concurrent les ordinateurs les plus puissants d'IBM. C'est évidemment l'équipe de Manchester qui en bénéficie.

²⁵⁶ A titre d'exemple, l'IBM 709 est installé à l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) qui utilise également des services du SWAC depuis 1954. Voir (Ray Pepinsky, Robertson et Speakman (eds.) 1961, p. 188). Voir aussi page 164.

²⁵⁷ La description la plus complète est publiée en 1961 (Arndt et Phillips 1961) et des modèles préliminaires ont été présentés à diverses occasions en 1958 (Physical Society Exhibition) et 1959 (International Union of Crystallography 1959- Stockholm).

En 1969, si les ordinateurs sont évidemment encore plus omniprésents, les modèles spécifiques en revanche ne sont que très peu mentionnés en dehors des IBM7094 et IBM/360, c'est-à-dire les grands calculateurs du marché. La problématique de conception a basculé vers le logiciel et la programmation en langage Fortran, ou Algol mais beaucoup moins fréquemment²⁵⁸. La conception de ces systèmes cristallographiques est désormais accompagnée par les services de « Computer science center », autrement dit des services informatiques. Une grande partie du travail logiciel est cumulatif, reposant sur des bibliothèques de programmes partagés et alimentés au fur et à mesure des développements. L'instrumentation pour le calcul cristallographique rime désormais avec logiciel. L'artefact matériel, c'est-à-dire l'ordinateur, est une machine générique, qu'il s'agit d'instrumentaliser par la voie des logiciels : l'algorithmique et l'analyse numérique sont partie prenante de l'élaboration de ces artefacts logiciels dédiés.

H. Deux fabriques différentes d'instruments de Fourier

Après le parcours historiographique dans la spectroscopie FTIR, notre incursion dans la fabrique de la cristallographie par diffraction de rayons X montre l'intérêt d'explorer l'instrumentation scientifique par le biais des savoirs mathématiques. L'analyse de Fourier a été l'artefact utilisé par les Bragg pour la théorisation du processus physique de diffraction et pour construire un mode d'interprétation des résultats expérimentaux. Arthur Patterson invente un instrument mathématique à la mesure du problème des phases, élaboré avec les ressorts de l'analyse de Fourier encore en gestation chez Norbert Wiener. Lipson et Beevers conçoivent et perfectionnent leur instrument de calcul des synthèses de Fourier, dont l'artefact matériel sous forme de bandes est pétri d'une analyse numérique des sommes trigonométriques. Des années 1930 aux années 1960 les instruments mathématiques de Fourier de natures mécaniques, mécanographiques, optiques, électriques, électroniques se multiplient : chacun peut reprendre les principes d'un précédent, ce qui est particulièrement vrai des bandes de Lipson-Beevers, ou se construire sur des principes très nouveaux, optiques en particulier. On trouve des constantes et des nouveautés, des évolutions très incrémentales et des innovations plus radicales, des promesses et des échecs parmi ce foisonnement d'instruments de Fourier. Jusqu'au grand basculement dans les techniques informatiques, progressif dans les années 1950 puis accéléré dans les années 1960, qui se nourrit des trente années de développement d'instruments mathématiques tout en redéfinissant les possibilités de l'encapsulage de savoirs mathématiques.

Cette histoire renseigne sur les divers rôles joués par les mathématiques dans l'instrumentation. Comme en spectroscopie, une partie des savoirs sont déjà constitués avant d'être mobilisés dans l'instrumentation, et une autre partie est créée pour les nécessités de l'instrumentation, en particulier l'interprétation des résultats. Ils assurent des fonctions épistémiques indispensables. Entre l'instrumentation en spectroscopie et en cristallographie des points communs affluent. Les bandes de Lipson-Beevers sont utilisées ponctuellement en spectroscopie. Les instruments optiques de Fourier ont inspiré Lawrence Mertz pour la spectroscopie. La combinaison de l'automatisation de l'instrument et des calculs de Fourier avec l'ordinateur dessine un horizon en partie commun à ces instrumentations après 1970.

Il est tout aussi important d'insister sur un certain nombre de différences entre ces instrumentations dans les modes d'association des savoirs mathématiques. Commençons par

²⁵⁸ Le langage Fortran, acronyme de « Formula Translation » et conçu chez IBM en 1957, est implanté sur tous les systèmes informatiques utilisés, contrairement à Algol, qui connaît surtout un succès auprès des universitaires.

souligner que les mathématiciens sont plus présents et impliqués, certes de manière tardive, en cristallographie : il semblerait que la spectroscopie FTIR soit exclusivement le produit des développements de physiciens et praticiens des mathématiques. Jusque dans les années 1940, la cristallographie suit une voie similaire, mais après 1950 le domaine soulève de nouvelles problématiques mathématiques, prises en charge par des mathématiciens : le problème des phases est le premier de ces problèmes abordés par les mathématiques appliquées.

Par ailleurs, les compromis instrumentaux sont très différents et la cristallographie par diffraction de rayons X a une chronologie très spécifique. Les principes de l'analyse de Fourier sont inscrits plus tôt dans les instruments, beaucoup plus développés déjà dans les années 1940, alors que la spectroscopie FTIR n'a pas encore émergé. L'automatisation des procédés instrumentaux apparaît très tôt comme un objectif, à commencer par la mécanisation des calculs massifs. L'automatisation des diffractomètres, l'intégration dans des chaînes instrumentales complètes sont déjà très avancées à la fin des années 1950. Les machines digitales sont préférées non pas seulement pour la précision du calcul numérique, mais parce qu'elles permettent une liaison cohérente et globale : en ce sens les instruments de Fourier analogiques introduisent des opérations hétérogènes du processus instrumental automatisé.

La cadence d'évolution des instruments et leurs performances sont directement liées à un paramètre : le nombre d'atomes qui composent les structures qu'il est possible d'analyser. Dans les années 1950, les structures de quelques dizaines d'atomes sont des défis analytiques, qui prennent des mois de calcul et de mobilisation d'instruments. L'élucidation de l'hémoglobine, de la vitamine B12 et de l'ADN sont des prouesses. Environ 500 structures cristallines ont été analysées et publiées en 1959, elles ont en moyenne moins de 20 atomes²⁵⁹. Dans les années 1960, avec les ordinateurs mainframes, les structures à 100 atomes sont analysables, en moins de 6 mois. En 1965, 4000 structures sont connues et publiées, en 1970 elles sont plus de 8000. L'inflation de la taille des structures analysées accompagne en quelque sorte, au plus près, les performances des ordinateurs. Les calculs sont décuplés, le coût global en calcul est toujours très élevé, même si les ordinateurs sont plus puissants. Jusque dans les années 1970, les calculs cristallographiques sont immenses et parmi les plus importants utilisateurs d'ordinateurs.

Pour les évolutions durant les années 1960 surtout, le défi instrumental est composé de trois facettes complémentaires : le calcul de Fourier, la collecte et le traitement de données massives, la visualisation. Sur tous ces points le développement logiciel devient primordial, orienté par le calcul intensif dans le premier cas, par les systèmes de gestion de données massives dans le second, et s'ouvrent vers les « Computer graphics » dans le troisième. Mais c'est aussi ce qui complique beaucoup le travail de l'historien. Non seulement les programmes sont complexes mais même lorsqu'ils sont documentés et conservés, rien ne garantit qu'ils soient encore utilisables : dans les années 1960 ils restent fortement liés aux machines pour lesquelles ils ont été développées ; or ces dernières ne fonctionnent plus, même si les matériels ont été conservés. Tout juste existe-t-il un petit Musée virtuel des logiciels

²⁵⁹ Le Cambridge Crystallographic Data Centre collecte toutes ces données : [<https://www.ccdc.cam.ac.uk/> consulté le 21/04/2019].

cristallographiques²⁶⁰, mais qui ne reflète pas l'ensemble des projets des années 1960 par exemple.

Au terme de ce parcours historiographique, il reste une interrogation, une surprise et un paradoxe : le non-usage de l'algorithme de FFT avant 1971. L'algorithme n'est même quasiment pas utilisé avant le milieu des années 1970, ce qui est paradoxal pour un domaine si gourmand en calculs de transformées de Fourier. La première utilisation en 1971 est un exercice singulier, avec une portée limitée au regard des méthodes de l'analyse cristallographique. Il s'agit d'abord d'une méthode pour améliorer l'analyse structurale des protéines, qui nécessite beaucoup plus de calculs de transformée de Fourier que toutes les précédentes²⁶¹. Dans ce cas il est judicieux d'utiliser l'algorithme de FFT, que les deux cristallographes auteurs de la méthode ont d'ailleurs emprunté à Norman Brenner²⁶².

Au-delà de cette première presque artificielle, les cristallographes ont cherché à adapter l'instrument de la FFT à leurs problématiques. La FFT a en effet été développée surtout pour de l'analyse spectrale avec des séries temporelles à grand nombres de données N , choisis sous forme de puissance de 2. En cristallographie, la géométrie des cristaux, le mode de discrétisation de la cellule élémentaire et les méthodes de Lipson-Beevers, qui sont au premier plan de l'analyse numérique, font que le nombre de points N doit être complété artificiellement jusqu'à une puissance de 2 et reste bien plus petit qu'en analyse spectrale. Le gain direct par FFT est en fait très faible pour chaque calcul. L'intérêt potentiel est identifié, c'est un instrument qui permet de réduire les calculs, mais sans rien de miraculeux avant que des méthodes spécifiques soient inventées et adoptées²⁶³. La FFT reste un chapitre mineur pendant plusieurs années au regard des recherches informatiques prioritairement orientées sur l'automatisation et la visualisation des résultats d'analyses structurales.

Enfin, les chantiers de recherche historiographique à conduire sont évidemment nombreux et les contours sont faciles à identifier. Il y a un intérêt clair à suivre les groupes moteurs en Angleterre, dans plusieurs lieux. Les universités de Cambridge et Manchester sont le berceau de la cristallographie par diffraction de rayons X autour des Bragg, et un lieu de conception des instruments de Fourier des années 1930 jusqu'aux années 1950, nous en avons donné les grandes lignes. Mais la concurrence, l'extension, les modes de circulation de ces pratiques et de ces instruments dans les centres de recherche à Oxford, à Leeds, au Birkbeck College à Londres sont encore largement à élucider. Les savoirs, savoir-faire et instruments naviguent très facilement entre ces laboratoires, il faudra suivre les acteurs, les rencontres et moments collectifs pour en comprendre les tenants et aboutissants. L'ouverture vers les États-Unis est un sujet important après la seconde guerre mondiale, relié à la puissance industrielle

²⁶⁰ Le « Crystallography source code museum » maintenu par l'IUCr.

[<https://www.iucr.org/resources/commissions/computing/software-museum> consulté le 21/04/2019].

²⁶¹ « A method for the extension and refinement of crystallographic protein phases utilizing the fast Fourier transform » (Barrett et Zwick 1971).

²⁶² Brenner est celui qui a, avec Janine Connes et James Cooley, écrit les premiers algorithmes et programmes de FFT pour la spectroscopie FTIR. Voir page 91 et note 108.

²⁶³ Dans les premiers à attirer l'attention sur cette FFT en cristallographie on trouve (Bondot 1971). Les deux cristallographes qui ont élaboré les premiers programmes spécifiques sont Attilio Immirzi, puis Lynn Ten Eyck en 1972 dans l'article « Crystallographic Fast Fourier Transforms » (Immirzi 1973; Ten Eyck 1973). Dans la conférence sur le calcul cristallographique de 1975, à Prague (Tchécoslovaquie), une seule contribution aborde la FFT.

et scientifique du pays. C'est ce qui se manifeste de manière évidente avec l'invasion des technologies digitales, domaine dans lequel IBM bénéficie d'une puissance commerciale considérable.

Le dynamisme de ces recherches interroge fortement quant aux équivalents ou concurrents en France. Nous avons fait mention des instruments conçus par von Eller, autour du groupe d'André Guinier. Il existe au moins un autre projet, après-guerre, de conception de machines pour le calcul cristallographique : le projet d'Adolphe-Jean Rose, alors chargé de Recherches au CNRS, et qui sera en poste au Laboratoire de Minéralogie et de Chimie de l'Université de Paris. Toujours dans l'orbite de Guinier, Rose collabore avec von Eller, et un petit groupe se constitue sur le sujet. La machine de Rose²⁶⁴ est conçue et fabriquée entre 1948 et 1951 au Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) à Issy-les-Moulineaux. Dans cet univers des relais téléphoniques et de l'électrotechnique d'après-guerre, la machine fait penser aux machines de Beevers. La machine est même le premier et le seul calculateur numérique conçu au CNET sous la IV^{ème} République. Mais la mécanographie IBM, appliquant la méthode Lipson-Beevers, mettra un terme à ce projet très spécifique en 1953.

Ces machines témoignent des ramifications des groupes de recherches pilotés par Guinier, dont l'inscription institutionnelle est multiple : il est en poste au Cnam, il a un laboratoire à l'ONERA, il collabore au groupe de physique des solides à l'Université de Paris, et bientôt à Orsay. Mais dans les grandes conférences sur le calcul cristallographique, il n'y a pratiquement aucun contributeur des centres de recherche français²⁶⁵. Le parallèle avec la spectroscopie FTIR des années 1950, innocente des techniques digitales pour paraphraser Pierre Connes, éclaire partiellement ce point. Le sous-équipement en France en matière de calcul scientifique est patent, mais ne saurait être l'unique explication. Faut-il se contenter de penser que ce n'est pas un sujet dans les laboratoires français ? Qu'ils ne sont que des acteurs secondaires du calcul cristallographique ? ou qu'ils sont promoteurs d'autres manières de faire, d'autres pratiques cristallographiques ? Etant donné l'importance transversale du sujet, de la biologie moléculaire à la recherche sur les matériaux, ces questions amènent à explorer les rapports aux politiques scientifiques et techniques en développement après-guerre, à la frontière du civil et du militaire. L'analyse des pratiques cristallographiques autour d'André Guinier en France promet un point de comparaison important avec la fabrique « britannique » de ces instruments de Fourier, en termes de cultures matérielles, d'options prises sur le calcul et d'insertion institutionnelle : ces lignes dessinent les contours d'un projet de recherches doctorales original et ambitieux. L'ensemble de ces processus de conception instrumentale reste encore à inscrire dans la longue durée de l'analyse de Fourier et de son instrumentalisation, au sens de Rabardel, c'est le sujet de la partie suivante.

²⁶⁴ Le principe de la machine est expliqué (Rose 1948) ; un brevet est déposé par le CNRS en 1948. Pour le contexte entourant la conception au CNET, voir (Pierre Mounier-Kuhn 2010, p. 141).

²⁶⁵ Aucun en 1950 à Penn State. Un contributeur en 1960, Felix Bertaut du Laboratoire d'électrostatique et de Physique du métal à Grenoble, et un participant A. Dennery. Notons que Bertaut sera le fondateur du Laboratoire de Cristallographie du CNRS à Grenoble. En 1969 Gérard Bassi du Centre d'études nucléaires de Grenoble est le seul contributeur français, 8 autres participent. Très symboliquement, Bassi concourt aux travaux sur l'utilisation d'Algol pour la cristallographie. En 1975, dans l'école d'été suivante à Prague, on retrouve comme seul contributeur français Gérard Bassi.

IV. Pour une histoire des instruments de Fourier

Nos deux études de la fabrique de la spectroscopie FTIR et de la cristallographie par diffraction de rayons X ont montré l'intérêt d'entrer dans l'histoire de l'instrumentation contemporaine par le filtre de l'analyse de Fourier. Qu'il s'agisse de mobiliser des savoirs préconstitués ou d'élaborer des savoirs à la mesure des problématiques instrumentales, les savoirs de l'analyse harmonique, et l'analyse numérique qui les entoure, sont impliqués à tous les niveaux, dans les artefacts qui sont instrumentalisés (au sens de Rabardel) et dans les modes d'usage de ces instruments. Ces développements participent d'une mise en pratique des mathématiques de Fourier et de la conception d'instruments mathématiques nouveaux, dans des problèmes théoriques et expérimentaux qui se posent à des physiciens devenus, pour un certain nombre d'entre eux, des praticiens des mathématiques.

Ces histoires témoignent des rapports en constante évolution et diversification entre instrumentation et savoirs mathématiques de Fourier tout au long du 20^{ème} siècle. Il est étonnant pourtant de voir surgir depuis quelques années seulement l'idée d'un « retour de Fourier ». L'année 2018 a en effet marqué les 250 ans de la naissance de J.-B.-Joseph Fourier, occasion de célébrer pour la première fois à l'échelle nationale l'héritage de ce savant mathématicien-physicien. Après les premiers travaux des historiens John Herivel et Ivor Grattan-Guinness²⁶⁶ sur Fourier, remontant aux années 1970, le premier ouvrage biographique très complet sur Fourier, de Jean Dhombres et Jean-Bernard Robert²⁶⁷ est paru en 1998 seulement et n'a pas été surclassé depuis. Pour souligner la prise de conscience tardive de l'héritage de Fourier de nos jours, le mathématicien Jean-Pierre Kahane, grand connaisseur de son œuvre mathématique, a imaginé cette formule très évocatrice : le « Retour de Fourier »²⁶⁸. Le mathématicien Cédric Villani dans son *Théorème vivant* en 2012 écrivait quant à lui :

Et l'analyse de Fourier sert à tout : à analyser les sons et à les graver sur un CD, mais aussi à analyser les images et à les transmettre par Internet, ou à analyser les variations du niveau de la mer et à prédire les marées... [...] son "grand poème mathématique" (comme disait Lord Kelvin), est utilisé chaque jour par des milliards d'humains qui ne s'en rendent même pas compte.²⁶⁹

Fourier n'a jamais été autant célébré qu'en ce début de 21^{ème} siècle. Cependant tout ce qui a été présenté au sujet des instruments de Fourier donne à voir une histoire un peu différente. S'agit-il d'un simple retard de célébration, d'une myopie de mathématiciens ? Faudrait-il considérer que du strict point de vue des savoirs mathématiques ce « retour » soit postérieur au développement de l'instrumentation de Fourier ? Cet étonnement donnera lieu ici à une mise en dialogue de l'histoire des instrumentations traitées ci-dessus, avec l'histoire des savoirs mathématiques de Fourier élaborés par les mathématiciens. Ce qui permettra de poser de nouveaux jalons pour une histoire approfondie de l'instrumentation contemporaine prenant en considération les savoirs et les instruments de Fourier, élargie dans ses objets et dans sa périodisation.

²⁶⁶ (Herivel 1973; Herivel 1975; Grattan-Guinness 1970; Grattan-Guinness 1972; Grattan-Guinness 1993).

²⁶⁷ (Dhombres et Robert 1998).

²⁶⁸ (Kahane 2009) et voir [URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/medihal-01412014/document> consulté le 4/4/2019].

²⁶⁹ (Villani 2012).

Nous commencerons par un grand angle sur l'héritage de Fourier depuis ses travaux du début du 19^{ème} siècle, interrogeant ce « retour de Fourier » et les représentations qui circulent à ce sujet. Il sera suivi d'un retour à Fourier, une manière de réinscrire et réarticuler l'histoire des instruments de Fourier avec une histoire mathématique de l'analyse de Fourier. Cela permettra de reconstituer quelques préliminaires des périodes et instrumentations analysées précédemment dans les cas d'étude et de donner plus de profondeur aux problématiques que nous soulèverons dans le 20^{ème} siècle. Au 19^{ème} siècle les questions du développement des savoirs mathématiques côtoient déjà les problématiques de l'instrumentation et les questions pratiques du calcul.

L'ambition est de mettre en regard les savoirs mathématiques constitués, leur évolution, avec les savoirs spécifiques élaborés par les praticiens des mathématiques nombreux engagés autour des instruments de Fourier, et de préciser les multiples fonctions instrumentales des savoirs mathématiques de Fourier. C'est aussi l'occasion d'interroger la circulation des savoirs de Fourier entre ces différents univers et de mieux cerner la culture matérielle de l'analyse de Fourier. Nous en viendrons donc aux artefacts de l'analyse harmonique et leur instrumentalisation, dans les versants matériels et dans leurs aspects plus abstraits : des analyseurs harmoniques comme moyens de calculer ou mesurer les composantes harmoniques des signaux, d'une part, aux développements mathématiques plus théoriques et leurs applications dans différents contextes.

Dans cette partie qui se veut programmatique, nous déclinons tous ces aspects en problématiques de recherche pour lesquelles nous poserons les principales questions et fixerons quelques jalons. Inspirées par les études de cas précédentes, deux thématiques nous paraissent prioritaires à développer : une histoire de l'optique de Fourier, qui sera suivie d'une analyse liminaire des origines et de la diffusion des procédés de FFT. L'ensemble définit une trame sur laquelle des approfondissements nécessaires seront dégagés au fil de la narration, concernant des acteurs, des collectifs, les lieux ou des disciplines dont il faudrait rendre compte. Nous ciblerons une période étendue jusqu'aux années 1970, attendue que la partie suivante traitera des évolutions liées à l'électronique dans ces années-là.

A. Quelques données quantitatives à propos du « retour » de Fourier

Pour donner quelques éléments quantitatifs en rapport avec l'idée d'un « retour » de Fourier, nous avons produit des « n-gram » sur « Google Books » pour différents termes afférents à l'analyse de Fourier. Ces « n-gram » quantifient des occurrences de termes, pris dans le corpus d'ouvrages très étendu des Google Books, et sont présentées sous forme de pourcentages d'ouvrages incluant ces termes. Les résultats sont certes quantitatifs mais évidemment très schématiques, et biaisés par un corpus fabriqué par Google. Il faudra donc les considérer comme une matière très brute pour donner un peu de substance quantitative, avec toute la prudence qui s'impose.

Pour réaliser ces « n-gram » nous avons distingué le corpus en français et en anglais, les résultats n'étant pas toujours superposables. Les termes suivants et leurs déclinaisons ont été traités : « Fourier series », « FFT », « Fourier transform », « Série de Fourier » (auxquels il faut adjoindre « Séries de Fourier », « Intégrale de Fourier »), « Analyse harmonique », « Harmonic analysis ». Le terme générique « Fourier » est un peu attrape-tout. À la décharge du moissonnage aveugle de Google Books, le corpus ne distingue pas *a priori* entre des ouvrages « de mathématiciens » et d'autres disciplines, ce qui a l'avantage de les considérer tous sur un

pied d'égalité dans le traitement, et l'inconvénient de ne pas être spécifiable dans le dénombrement. Les graphiques représentant ces n-grams sont donnés en annexe, page 373.

Quels constats pouvons-nous en tirer ?

1. Les termes comme « analyse harmonique » (« harmonic analysis », adjoints aux variations sur les « séries de Fourier ») n'ont jamais été autant employés que dans la période 1940-1960, avec une montée progressive sur le premier 20^{ème} siècle et un reflux ensuite.

2. Il faut rendre grâce à l'idée d'un « retour de Fourier », parce que tout confondu le nom de Fourier connaît un pic évident à la fin du 20^{ème} siècle.

3. Le terme « Fourier transform » (et « transformée de Fourier ») grimpe en flèche à partir de 1940. À partir de 1965, il est clair que le terme FFT appuie cette croissance, et y participe grandement. Le terme « FFT », auquel on a ajouté la traduction française « TFR », transformée de Fourier rapide, va croissant très rapidement jusqu'en 1980. C'est ensuite un plateau, un ralentissement, puis un reflux général sur tous les termes.

Nous avons volontairement confronté le terme « FFT » aux statistiques sur le terme « wavelet » ou « ondelette » en français. Le croisement de courbes entre les deux est évident et il renvoie à l'évolution récente vers la notion d'ondelette dans le traitement de l'information, ce qui est une forme de prolongement de l'analyse de Fourier. En anticipant sur les discussions à venir, les notions d'ondelettes, d'analyse spectrale et de traitement du signal ont à voir avec l'histoire des instruments de Fourier.

Gardons-nous bien de faire de ces n-grams des indicateurs directs de l'importance du sujet dans la communauté scientifique et technique, ce ne sont que des occurrences de termes, produits d'une analyse strictement textuelle du corpus. Ces chiffres s'interprètent comme l'intérêt plus ou moins marqué dans les ouvrages, toutes catégories confondues, pour les sujets en question.

L'interprétation la plus directe est que, sauf dans le corpus des ouvrages en français du début du 19^{ème} siècle, « Fourier » est un sujet du second 20^{ème} siècle. Nos instruments de Fourier sont comptabilisés, évidemment, dans ces statistiques même s'il est impossible d'en chiffrer le poids relatif. Néanmoins, c'est surtout la concordance temporelle avec l'histoire de ces instruments qui donne matière à penser. Les sujets de l'analyse harmonique, des séries et transformées de Fourier ont évidemment leur histoire mathématique, élaborée par des mathématiciens, mais ils doivent être relativisés à cette perspective instrumentale.

B. Retour « à » Fourier

L'histoire mathématique de l'analyse de Fourier démarre avec les travaux de J-B-Joseph Fourier, et même antérieurement puisque le sujet des séries trigonométriques a été posé au 18^{ème} siècle déjà : les séries ont été introduites dans l'analyse des cordes vibrantes, dans les théories du son et de la musique²⁷⁰. Le grand traité de Fourier, celui qui va susciter tant de développement, est sa *Théorie analytique de la Chaleur* publiée en 1822²⁷¹. Dans son « analyse

²⁷⁰ (Darrigol 2007; Kahane et Lemarié-Rieusset 1998).

²⁷¹ Le traité est l'aboutissement d'une série de recherches entamées plusieurs années auparavant : Fourier a présenté en 1807 et 1811 des mémoires à l'Institut sur « La théorie du mouvement de la chaleur dans les solides » ; c'est ce qui lui vaut le prix de l'Académie des sciences en 1812. Son traité (Fourier 1822) est republié dans le

spéciale », c'est ainsi qu'il l'appelle, Fourier rassemble ses résultats sur les séries trigonométriques, sur la transformée (qui sera baptisée transformée de Fourier par la suite) avec sa formule d'inversion et des utilisations concrètes, la première d'entre elles étant bien sûr la question de la diffusion de la chaleur. Fourier ne produit pas un simple traité mathématique : la fonction première de son traité est d'élaborer une méthodologie pour pouvoir traiter des phénomènes de la nature ou des phénomènes sociaux. Ces phénomènes doivent être mis en équation, puis il faut en trouver des solutions et aboutir à un calcul effectif : c'est tout le sens de son analyse spéciale, entre mathématique et physique. Jean Dhombres, biographe de Fourier, l'exprime ainsi :

Fourier fait de la physique-mathématique sans que l'une domine l'autre ou soit son adjectif. Il part d'expériences et de théories fondamentales, et non d'un raisonnement a priori. Il a ainsi montré que la chaleur se comporte comme une onde. Une idée aujourd'hui triviale, mais qui aurait fait éclater de rire n'importe quel chercheur de l'époque.²⁷²

Fourier est un de ceux qui a été saisi par la portée théorique et instrumentale des séries trigonométriques, qui les a transformées en un véritable instrument mathématique. Il a établi des rudiments théoriques, des formules de calcul et indiqué des exemples concrets d'utilisation de cet instrument. En ce sens les formules, dites de Fourier, sont fondamentales pour lui car elles donnent des résultats pratiques très rapidement : il suffit souvent, dans la pratique, de limiter le calcul aux premiers termes de la série pour avoir une bonne approximation du résultat.

En d'autres termes, Fourier élabore une méthodologie de la recherche en physique, dont l'instrument principal doit reposer sur son « analyse spéciale » (qui deviendra l'analyse de Fourier) et qui constitue l'artefact de cette instrumentation. Pour caractériser des phénomènes généraux, le savant doit combiner l'instrument mathématique simple et général, avec les mesures physiques et les observations des phénomènes à étudier.

Dans les faits, Fourier laisse de côté une grande partie de la question mathématique de la convergence de ces séries, question très difficile qui occupera les mathématiciens sur plusieurs générations après lui : il considère quasiment acquise cette convergence dans les cas qui lui sont utiles, pour lesquels les premiers termes de la série suffisent pour les calculs effectifs et sans spécifier les conditions générales que doit remplir la fonction à développer en série trigonométrique. Le pragmatisme de l'instrument l'emporte sur la rigueur mathématique. Il ne s'inscrit donc pas dans la montée de la pensée mathématicienne tenante de la rigueur au 19^{ème} siècle, et conserve une proximité avec la pensée physicienne. Il ne faudrait pas, malgré tout, insinuer qu'il écrit son traité sans rigueur. Mais ce traité prend d'abord la forme d'un programme plus que d'un corpus abouti, ce qui en a fait un sujet de malentendu au 19^{ème} siècle, reléguant le physicien-mathématicien Fourier hors du périmètre des mathématiques rigoureuses²⁷³.

premier tome des *Œuvres de Fourier* éditées en 1888 par Gaston Darboux. Pour plus de détails sur les cheminements de Fourier avant le traité de 1822 : (Grattan-Guinness 1972; Herivel 1975; Dhombres et Robert 1998).

²⁷² Cité dans l'article « Joseph Fourier transforme toujours la science » du *Journal du CNRS*, 21 mars 2018 : [URL : <https://lejournald.cnrs.fr/articles/joseph-fourier-transforme-toujours-la-science> consulté le 4/4/2019].

²⁷³ (Kahane et Lemarié-Rieusset 1998; Kahane 2009).

C. Les mathématiques autour de Fourier au 19^{ème} siècle

Dans tous les cas, l'analyse spéciale de Fourier est un stimulant important du développement mathématique au 19^{ème} siècle car elle recèle des questions primordiales mathématiquement et nécessite d'éclaircir les notions fondamentales de fonction, de série et d'intégrale qui sont manipulées dans l'analyse spéciale. Qu'est-ce qu'une série de fonctions ? À quelles conditions convergent-elles ? Dans quels cas les formules de Fourier sont-elles valables ? Ces questions animent les mathématiciens tout au long du 19^{ème} siècle, dans un programme qui indique que l'analyse spéciale est une sorte d'artefact avec lequel ils doivent composer, certains pour en contester le bien-fondé, d'autres pour le renforcer, le stabiliser, l'amplifier.

La notion de fonction est centrale dans l'analyse spéciale, elle l'est en fait dans les mathématiques en pleine évolution depuis le 18^{ème} siècle. La fonction est l'objet inconnu des équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles, équations qui envahissent tous les pans de la physique. Schématiquement, deux lignes de développement mathématique²⁷⁴ vont se déployer au 19^{ème} siècle : celle de Fourier-Riemann avec leurs séries trigonométriques de fonctions, et celle reposant sur les travaux des mathématiciens Carl F. Gauss et Augustin Louis Cauchy qui conduit à l'élaboration de concepts de base de l'analyse comme la continuité et la convergence.

C'est le mathématicien allemand Bernhard Riemann (1826-1866) qui donne, dans sa thèse de 1854, la première théorie générale des séries de Fourier - et qui, rappelons-le, attribue le nom de « Fourier » à ces séries. Riemann élabore une théorie de l'intégration, indépendante du calcul différentiel, qui est susceptible de donner un sens mathématique au calcul des intégrales de Fourier. Les principaux concepts d'intégration seront d'ailleurs liés aux formules intégrales de Fourier, qui permettent de donner les coefficients de Fourier à partir de la fonction, et réciproquement : toute théorie de l'intégration doit en quelque sorte assurer la validité de ces formules, dont la valeur pratique en fait des incontournables mathématiques.

La question de la convergence des séries de Fourier est un sujet récurrent, et les résultats abondent sur le siècle, entre conditions de convergence, types de convergences, théorèmes et contre-exemples. Le concept de fonction est bousculé par l'idée qu'il est possible de représenter une fonction discontinue par des séries trigonométriques de Fourier. Au tournant du siècle, Henri Lebesgue introduit une nouvelle notion d'intégrale. Le théorème de Féjer (1900), l'égalité de Parseval (établie par Fatou, qui lui donne ce nom dans sa thèse en 1907) et le théorème appelé Riesz-Fischer (1907)²⁷⁵ permettent d'asseoir la notion d'intégrale de Lebesgue et de préciser les espaces de fonctions pour lesquelles les transformées de Fourier sont pertinentes. C'est aussi un point de départ de l'analyse fonctionnelle. Ces résultats répondent à bon nombre d'interrogations sur les séries trigonométriques et la transformée de Fourier, sous-tendue par un

²⁷⁴ Nous reprenons la thèse développée dans (Dahan et Peiffer 1986).

²⁷⁵ Le théorème de Leopold Féjer établit le résultat suivant dans la théorie des séries de Fourier : pour les fonctions continues, les moyennes arithmétiques des sommes partielles des séries de Fourier convergent. Elles convergent même uniformément (Féjer 1900). Le théorème de Plancherel en 1910 qui permet d'étendre la transformée de Fourier aux fonctions de carré sommable (Plancherel 1910). L'égalité de Parseval exprime que la transformation de Fourier réalise une isométrie de L^2 (espace des fonctions de carré intégrable) vers l^2 (espace des suites telles que la série des modules au carré est convergente) : il est démontré par Pierre Fatou (Fatou 1907). Le théorème de Riesz-Fischer établit l'isomorphisme isométrique de L^2 et de l^2 par transformation de Fourier. Le résultat a été obtenu indépendamment par le hongrois Frigyes Riesz et l'autrichien Ernst Fisher en 1907.

concept d'intégration renouvelé et adapté. Ils sont malgré tout, et rétrospectivement, des préliminaires à un nouveau cadre étendu pour l'analyse harmonique, renouvelé par les travaux de Norbert Wiener après 1930, dans un processus de généralisation et au prix d'un cran supplémentaire d'abstraction.

À travers le grand nombre de mathématiciens impliqués, il est clair que l'analyse de Fourier, reposant sur son traité de 1822 et ses dérivés, ont eu une influence considérable en France, en Grande-Bretagne et en Europe en général. Jusque dans les travaux les plus fondamentaux pour les mathématiques, en théorie des ensembles, puisque Georg Cantor introduit la théorie des ordinaux en rapport avec la question de l'unicité du développement d'une fonction en série de Fourier²⁷⁶.

D. Kelvin, Rayleigh, Poincaré : l'analyse harmonique en physique au 19^{ème} siècle

Cette trame mathématique montre en quoi, en un sens, l'analyse spéciale de Fourier a été un instrument du développement des mathématiques elles-mêmes, jusque dans leurs fondements. Ces jalons doivent maintenant être mis en regard du développement des théories physiques sur la même période, sujet dual et inséparable de l'analyse spéciale dans l'esprit de Fourier. Nous ne ferons que survoler quelques traités qui ont été marquants pour leurs contemporains, attachés aux physiciens les plus influents du 19^{ème} siècle, à commencer par James Thomson (Lord Kelvin) et John W. Strutt (Lord Rayleigh), dont les noms sont apparus déjà à de multiples reprises dans ce mémoire.

L'ouvrage de Thomson et Tait *Treatise on natural philosophy* est sans doute un des ouvrages les plus importants de la physique du 19^{ème} siècle²⁷⁷. Les premiers mots, dans la préface de l'ouvrage, sont symboliquement une phrase de Fourier, en français dans le texte²⁷⁸. Le traité place le mouvement harmonique comme concept clé de la physique et fait de la composition des mouvements harmoniques un mode d'appréhension des phénomènes.

*We must [...] devote some pages to the consideration of Fourier's Theorem, which is not only one of the most beautiful results of modern analysis but may be said to furnish an indispensable instrument in the treatment of nearly every recondite question in modern physics. To mention only sonorous vibrations, the propagation of electric signals along a telegraph wire, and the conduction of heat by the earth's crust, as subjects in their generality intractable without it, is to give but a feeble idea of its importance.*²⁷⁹

Ils emploient le terme « instrument » dans un sens que nous ne démentirons pas ici. Ce « théorème de Fourier » n'est pas un résultat dont la démonstration mathématique rigoureuse est acquise. Il pose un problème pour les physiciens lorsqu'il s'agit de phénomènes brusques ou qui présentent une discontinuité mais, dans la lignée de la pensée de Fourier dont Thomson est un grand admirateur, il est très simplement utile et indispensable pour rendre compte des

²⁷⁶ (Pier 1990).

²⁷⁷ (Kelvin et Tait 1867), réédité de nombreuses fois pendant plusieurs décennies.

²⁷⁸ « Les causes primordiales ne nous sont point connues ; mais elles sont assujetties à des lois simples et constantes, que l'on peut découvrir par l'observation, et dont l'étude est l'objet de la philosophie naturelle » phrase de Fourier répétée à l'envie dans les ouvrages de physique depuis (*Ibid.*, p. v).

²⁷⁹ Les principes de Fourier sont exprimés en plusieurs endroits dans le traité. « The celebrated theorem discovered by Fourier for the development of an arbitrary periodic function in a series of simple harmonic terms. » – ils font référence au traité de Fourier de 1822, mentionnant comme unique autre référence, un résultat préliminaire de J.L. Lagrange.

phénomènes de diffusion de la chaleur, de vibrations, d'oscillations, etc. Cette instrumentation n'est pas une « application » du théorème, c'est également un point à souligner : il s'agit d'une interprétation physique en termes de théorie physique, dont l'instrument sont les mathématiques de Fourier.

Le second traité du 19^{ème} siècle que nous mentionnerons est le tout aussi célèbre *Theory of sound* de Lord Rayleigh, publié en deux volumes pour la première édition en 1877-78. Dans une logique de présentation qui est inspiré du *Treatise* de Thomson et Tait, Rayleigh présente le mouvement harmonique puis la composition des harmoniques, dans le chapitre 2 de son traité.

*Another case of great importance is the composition of vibrations corresponding to a tone and its harmonics. It is known that the most general single-valued finite periodic function can be expressed by a series of simple harmonics [...] A theorem usually quoted as Fourier's. Analytical proofs will be found in Todhunter's Integral Calculus and Thomson and Tait's Natural Philosophy ; and a line of argument almost if not quite amounting to a demonstration will be given later in this work.*²⁸⁰

*The reason of the preeminent importance of Fourier's series in Acoustics is the mechanical one referred to in the preceding chapter, and to be explained more fully hereafter, namely, that, in general, simple harmonic vibrations are the only kind that are propagated through a vibrating system without suffering decomposition.*²⁸¹

À noter que Rayleigh ne fait plus référence au traité de Fourier directement, mais à Thomson&Tait, d'une part, et à l'ouvrage du mathématicien Isaac Todhunter (1820-1884) d'autre part²⁸². Dans la lignée des travaux de Fourier, il s'agit de structurer toute l'analyse des oscillations et des vibrations. On peut le penser comme un paradigme d'une théorisation physique des oscillations, dans le contexte des phénomènes linéaires : ce paradigme sera contesté quand l'analyse des phénomènes non linéaires ne pourra plus être contournée par les méthodes linéaires.

Puisque plusieurs acteurs des instruments de Fourier l'ont mentionné, nous noterons que Rayleigh est un des rares physiciens qui a approfondi très tôt la question de l'utilisation concrète de la transformée de Fourier en physique, surtout pour en souligner les difficultés et limitations liées aux calculs concrets : Rayleigh fait paraître son texte « Remarks concerning Fourier's theorem as applied to physical problems » en 1912 dans le *Philosophical Magazine*²⁸³.

Le choix de ces deux traités, pris dans la physique anglaise de l'époque victorienne, est évidemment très partiel, mais à notre connaissance la réception des théories de Fourier et leurs modes d'instrumentation n'a pas été analysée de manière systématique à l'échelle européenne par exemple²⁸⁴, ni même en France simplement. Nous en donnerons seulement un autre aperçu dans l'œuvre d'Henri Poincaré, qui traite de la propagation de la chaleur dans son cours de Physique-mathématique en 1893-94 :

²⁸⁰ (Rayleigh 1877, p. 23).

²⁸¹ (*Ibid.*, p. 24).

²⁸² Auteur prolifique de multiples traités, avec une influence et un lectorat important dans l'Angleterre victorienne. Voir (Flood, Rice et Wilson (eds.) 2011).

²⁸³ (Rayleigh 1912).

²⁸⁴ Les circulations et les réceptions de la physique-mathématique au 19^{ème} siècle ont fait l'objet de plusieurs études de cas, à l'image des travaux de Reinhard Siegmund-Schulze, Thomas Archibald, Rossana Tazzioli, par exemple : (Archibald 1989; Archibald 1996; Siegmund-Schulze 2007; Tazzioli 2001).

La théorie de la chaleur de Fourier est un des premiers exemples de l'application de l'analyse à la physique ; en partant d'hypothèses simples qui ne sont autre chose que des faits expérimentaux généralisés, Fourier en a déduit une série de conséquences dont l'ensemble constitue une théorie complète et cohérente. Les résultats qu'il a obtenus sont certes intéressants par eux-mêmes, mais ce qui l'est plus encore est la méthode qu'il a employée pour y parvenir et qui servira toujours de modèle à tous ceux qui voudront cultiver une branche quelconque de la physique mathématique.

J'ajouterai que le livre de Fourier a une importance capitale dans l'histoire des mathématiques et que l'analyse pure lui doit peut-être plus encore que l'analyse appliquée.²⁸⁵

Dans l'ouvrage *La valeur de la science* de 1904, Poincaré renouvelle ses réflexions sur le sujet :

La série de Fourier est un instrument précieux dont l'analyse fait un usage continu, c'est par ce moyen qu'elle a pu représenter des fonctions discontinues ; si Fourier l'a inventée, c'est pour résoudre un problème de physique relatif à la propagation de la chaleur. Si ce problème ne s'était posé naturellement, on n'aurait jamais osé rendre au discontinu ses droits ; on aurait longtemps encore regardé les fonctions continues comme les seules fonctions véritables.

La notion de fonction s'est par là considérablement étendue et a reçu de quelques analystes logiciens un développement imprévu. Ces analystes se sont ainsi aventurés dans des régions où règne l'abstraction la plus pure et se sont éloignés autant qu'il est possible du monde réel. C'est cependant un problème de physique qui leur en a fourni l'occasion.

Derrière la série de Fourier, d'autres séries analogues sont entrées dans le domaine de l'analyse ; elles y sont entrées par la même porte ; elles ont été imaginées en vue des applications.²⁸⁶

Le traité de Fourier est fait d'allers-retours entre les problèmes concrets de la physique et l'analyse mathématique plus abstraite, l'une nourrissant l'autre. Au-delà de l'instrument des séries de Fourier, c'est la méthodologie et l'approche de Fourier qui a une valeur aux yeux de Poincaré. Il résume les perspectives émergentes de la physique-mathématique au 19^{ème} siècle dans son texte de 1890 sur les équations différentielles issues de la théorisation en physique :

Quand on envisage les divers problèmes de Calcul Intégral qui se posent naturellement lorsqu'on veut approfondir les parties les plus différentes de la Physique, il est impossible de n'être pas frappé des analogies que tous ces problèmes présentent entre eux. Qu'il s'agisse de l'électricité statique ou dynamique, de la propagation de la chaleur, de l'optique, de l'élasticité, de l'hydrodynamique, on est toujours conduit à des équations différentielles de même famille et les conditions aux limites, quoique différentes, ne sont pas pourtant sans offrir quelques ressemblances.²⁸⁷

Des phénomènes *a priori* de natures différentes trouvent une théorisation dans les mêmes termes mathématiques, dans les mêmes équations. La théorie physique conduit à la recherche de solutions de ces équations type, par exemple la recherche de fonctions « harmoniques » sur un domaine et dont les valeurs sont fixées aux frontières de ce domaine (problème de Dirichlet). C'est à l'image des relations permanentes entre théorie physique et analyse mathématique au 19^{ème} siècle, qui s'illustrent dans les travaux de nombreux autres mathématiciens et physiciens²⁸⁸, de George Green (1793-1841) à Rudolf Lipschitz (1832-

²⁸⁵ (Poincaré 1895, p. 1).

²⁸⁶ (Poincaré 1904, p. 150-151).

²⁸⁷ (Poincaré 1890, p. 211).

²⁸⁸ Les travaux sont nombreux, mentionnons ici (Archibald 1996; Tazzioli 2001; Siegmund-Schultze 2007).

1903), Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805–1859) Carl Gottfried Neumann (1832–1925), Bernhard Riemann (1826–1866), pour n'en citer que quelques-uns.

D'une part l'analyse de Fourier fait partie des instruments mathématiques et méthodes générales pour la théorisation de la physique, dont il faudrait cerner les évolutions, les processus de généralisation, les modes d'abstraction et les applications : l'analyse de Fourier comme instruments pour les mathématiques est un sujet que l'historiographie a su traiter, mais comme instrument de la physique, elle reste à analyser et à écrire en rentrant davantage dans les traités, les revues de physique et les différentes « écoles » de la physique, entre la Grande-Bretagne et le continent.

D'autre part, nous avons pour l'instant laissé de côté la question du calcul effectif et de l'évaluation numérique des coefficients et intégrales de Fourier. C'est dans les problèmes concrets que se sont posées les difficultés puisque les calculs sont rapidement inextricables pour les physiciens et les ingénieurs, mais qui ont développé leurs propres connaissances et pratiques mathématiques pour y parvenir.

E. L'analyse harmonique pour l'ingénieur

Cette problématique du calcul effectif va être amplifiée par les besoins d'une industrialisation croissante et les technologies émergentes à la fin du 19^{ème} siècle, dans lesquelles les oscillations et les vibrations deviennent constituantes des phénomènes à étudier, à contrôler ou à reproduire. Il peut s'agir de produire des oscillations, de contrôler des oscillations ou de réduire des vibrations délétères dans un dispositif technique. Aux domaines déjà institués de la mécanique, des vibrations sonores et acoustiques, viennent s'ajouter l'électrotechnique, la télégraphie, puis la TSF (Télégraphie Sans Fil) au début du 20^{ème} siècle. Les courants alternatifs, universellement adoptés pour la diffusion de l'énergie électrique à distance, sont des oscillations électriques, théoriquement sinusoïdales, mais qu'il faut produire, mesurer, calibrer, transformer. Un signal en télécommunication, et tout particulièrement en TSF est produit avec des oscillations électriques, envoyées sous forme d'ondes électromagnétiques hertziennes à haute fréquence : il faut produire des signaux puissants tout en maîtrisant leurs fréquences, et être capable de les recevoir et de les amplifier quand ils sont faibles à la réception.

Ces évolutions technologiques ont nécessité un travail considérable d'ingénierie et d'expérimentation. Et si le paradigme des physiciens, à l'image du traité *Theory of sound*, offre un cadre solide et stable, le passage au concret a toujours constitué un défi relevé, réussi ou avorté selon les circonstances. Mais le contexte industriel laisse de moins en moins de part au hasard, raison pour laquelle ces expériences se sont appuyées de plus en plus sur des méthodes de recherche et de calcul, une instrumentation nouvelle, incluant des instruments mathématiques et d'autres formes multiples d'instruments matériels, ne serait-ce que pour « voir », visualiser, représenter graphiquement ces oscillations. En retour l'industrie peut bénéficier d'instruments plus fiables pour une qualité de production mieux contrôlée. Ces méthodes ont été systématisées dans des corpus et des manuels à destination des ingénieurs.

Dans ces efforts tous azimuts, la quantité de savoirs mathématiques produite et diffusée est considérable, l'historiographie n'en a probablement donné qu'un très faible aperçu. Ce sont les inconnues d'un projet d'analyse de grande ampleur des pratiques et usages de l'analyse harmonique dans le monde des ingénieurs. Car c'est bien du côté des ingénieurs, avec leurs

pratiques, leurs revues, et leur contexte d'exercice, en milieu industriel et en pleine expansion, qu'il nous faut explorer.

Le milieu de l'ingénierie électrique offre de bons exemples de ces travaux mathématico-industriels. Parmi les physiciens-ingénieurs, on peut citer le britannique Silvanus Thompson (1851-1916), auteur de nombreux travaux en électricité et célèbre auteur d'un ouvrage plus orienté sur la vulgarisation des mathématiques *Calculus made easy* en 1910²⁸⁹. Pour le sujet qui nous intéresse très directement, il est surtout le créateur d'une méthode d'approximation des calculs de coefficients de Fourier, publiée en 1903. Reprise dans le milieu avide de ce type de méthodes pratiques, elle est inspirée par les méthodes du mathématicien Carl Runge²⁹⁰. Cela situe ces travaux entre la physique et l'analyse numérique, dans une recherche de compromis entre efficacité, rapidité de calcul et approximation. Cette recherche est probablement une des grandes constantes dans l'histoire de l'instrumentation de Fourier.

Dans le même milieu, l'ingénieur et mathématicien Charles P. Steinmetz (1865- 1923) a été d'une influence considérable aux États-Unis. Il est, aux côtés de Nikola Tesla et Thomas Edison, un multi-inventeur et fondateur de l'ingénierie électrique moderne, centrée sur les courants alternatifs. Dès 1894 il participe aux grandes transformations de ce qui deviendra General Electric à Schenectady (Etat de New York), devient professeur à l'Union College en 1902. De par sa position centrale dans les associations d'ingénieurs, il fera de la formation des ingénieurs une priorité et de l'enseignement des mathématiques pour l'ingénieur un cheval de bataille. Son traité de 1911, *Engineering mathematics*, réédité de nombreuses fois, est le *vade-mecum* de l'ingénierie électrique. Le troisième chapitre est consacré aux « Trigonometric series », à leur utilisation pour les courants électriques et détermination des harmoniques. L'ensemble est assorti des méthodes de calcul numérique et d'approximations utiles à l'art de l'ingénieur.

Encore une fois, ce ne sont que des illustrations très ponctuelles d'une recherche mathématique d'efficacité dans les calculs et mesures pour l'ingénieur. Il suffit de dépouiller quelques numéros des revues spécialisées dans le domaine pour saisir l'ampleur de ces efforts : *The Electrician*, *Elektrotechenische Zeitschrift*, *Journal of the Institute of Electrical Engineers*, etc.

Du côté de l'ingénierie mécanique, on trouvera le pendant de ces recherches, en théorie des vibrations et de l'élasticité par exemple. Les travaux de Stephen Timoshenko (1878-1972), considéré comme fondateurs de l'ingénierie mécanique moderne en sont une illustration. Timoshenko émigre de Russie aux États-Unis en 1922, après une première vie intense en mécanique, il devient ingénieur chez Westinghouse Electric (jusqu'en 1927) puis professeur à l'Université du Michigan, puis à Stanford (1936). Son traité *Vibration problems in engineering* de 1928 est une référence dans le domaine²⁹¹.

Son assistant à Westinghouse est Jacob Pieter Den Hartog (1901-1989), un néerlandais émigré aux États-Unis en 1924. Il est ingénieur chez Westinghouse entre 1924 et 1931, avant une carrière plus académique, terminée au MIT. Den Hartog publie son traité *Mechanical*

²⁸⁹ (Thompson 1910).

²⁹⁰ (Runge 1903).

²⁹¹ (Timoshenko 1928). Il fait directement référence au traité de Rayleigh : « The most complete discussion of the vibration problems of elastic systems can be found in the famous book by Lord Rayleigh "Theory of Sound" ».

vibrations en 1934²⁹². Les trajectoires de Timoshenko et Den Hartog indiquent les niveaux de circulation de savoirs entre monde industriel, monde académique à des échelles internationales, et rendent manifestes les croisements entre les mathématiques appliquées, la mécanique théorique et les exigences de l'industrie. Le premier ouvrage sur la liste des références de Den Hartog en 1934 est toujours *The Theory of Sound*.

En contexte industriel toujours, nous évoquerons brièvement le cas des Bell Labs, dans les années 1920, qui sont déjà à ce moment-là un centre de recherche de premier plan et au sein desquels peut éclore le talent d'un mathématicien comme George A. Campbell (1870-1954). Il a étudié auprès de Felix Klein à Göttingen, de Ludwig Boltzmann à Vienne et même de Poincaré à Paris²⁹³. Au sein des Bell Labs il développe des travaux mathématiques pour les problèmes de la télégraphie et téléphonie longue distance. Campbell est surtout un des promoteurs des « mathématiques industrielles », qu'il défend comme pratique et comme carrière, assortie de modalités de formation de ces mathématiciens. Son discours à l'International Congress of Mathematicians à Toronto en 1924 mérite d'être évoqué²⁹⁴, tant il éclaire l'ambition de son traité ultérieur de 1928 consacré à l'utilisation de l'intégrale de Fourier :

In industry we are concerned with mathematics not as an objective, but only as a tool. [...] It is important to note the distinction between the using of tools and the making of tools [...] By long experience the tool designer has discovered how best to adapt the tool to its intended use in order to economize the workman's time and energy as much as possible. [...]

*But no complete line of mathematical tools is for sale across the counter; only a limited number of numerical and algebraic tables and a few types of calculating machines are supplied as ready-made tools.*²⁹⁵

Ce court passage mériterait un long commentaire général, nous y reviendrons quand il s'agira de reconsidérer dans une perspective plus large le sujet des mathématiques dans l'industrie. Nous nous contenterons de souligner qu'en substituant « instrument » à « tool », on ne trahit pas la pensée de Campbell et on l'inscrit au mieux dans nos réflexions. Campbell aux Bell Labs suit la ligne de conduite qu'il expose dans ce texte. Il mène un travail de systématisation autour de l'intégrale de Fourier, attendu que les phénomènes transitoires et non-périodiques ont leur importance dans un grand nombre de domaines, en particulier celui des télécommunications, Campbell a recouru à l'intégrale de Fourier plus qu'aux séries de Fourier. Mais les difficultés mathématiques sont inextricables. Il publie d'abord un long texte de 1928 intitulé « Practical application of the Fourier integral » qui insiste sur l'importance de la méthode de Fourier, les difficultés voire les impossibilités du calcul effectif et la trop forte dépendance de l'ingénieur aux mathématiciens. Il échafaude une méthode visant à réduire les calculs grâce à des tables :

*It is the purpose of this paper to take the first steps towards the preparation of two tables, one giving the evaluations of Fourier integrals and the other giving the sinusoidal solutions for physical systems. Together they would reduce the practical application of the Fourier integral to the selection of three results from these two tables.*²⁹⁶

²⁹² (Den Hartog 1934).

²⁹³ Quelques éléments biographiques sur Campbell dans (Tobies 2017).

²⁹⁴ Le texte est reproduit dans le Bell System Technical Journal : (Campbell 1924).

²⁹⁵ (*Ibid.*, p. 555).

²⁹⁶ (Campbell 1928, p. 641). Le texte se termine avec 44 pages de tables de résultats sur les transformées de Fourier.

La méthode est développée et étendue dans un ouvrage publié en 1931²⁹⁷. C'est bien une méthode générale appuyée par deux ensembles de tables de formules et des règles de combinaisons de résultats précalculés, classés et notés dans ces tables. C'est un instrument de Fourier à lui seul, pour ceux qui ont l'usage des transformées de Fourier dans un paysage presque vierge de solutions réellement pratiques. Le dispositif ne lève pas toutes les difficultés du calcul, et il demande surtout un apprentissage non négligeable des notations et de la méthode d'utilisation.

Ces exemples présentés trop brièvement n'ont pour seule fonction que d'indiquer des types d'instruments et de savoirs mathématiques élaborés en milieu industriel. Ces savoirs sont repris, synthétisés, systématisés, adaptés, dans une perspective instrumentale qui vise à concevoir les instruments mathématiques à la mesure du besoin industriel. Cela ne se limite pas à ces quelques exemples, même s'ils sont emblématiques, ni au seul sujet de l'analyse de Fourier, même si elle est centrale dans les sujets de l'électrotechnique et des télécommunications. En filigrane transparaissent également les rapports avec les « mathématiques appliquées » en phase d'institutionnalisation, à la fois comme pratique et comme discipline, dans les premières décennies du 20^{ème} siècle.

Ce tableau de l'analyse de Fourier en milieu industriel est à approfondir sous tous ces aspects, auxquels il convient d'en ajouter deux autres : l'importance croissante des phénomènes non linéaires dans les systèmes techniques, avec leurs conséquences en termes théoriques et mathématiques, et la part des instruments appelés « analyseurs harmoniques » dans cette effervescence.

L'histoire du développement des théories des oscillations non linéaires²⁹⁸ offre un contre-point à la dynamique d'extension de l'analyse harmonique. En effet, la théorisation et la mathématisation de ces oscillations sont une sorte de bataille pour « sortir » du paradigme incarné par l'analyse de Fourier, valable uniquement dans les systèmes linéaires mais qui s'impose en général comme première approximation de tout système non linéaire. L'élaboration des théories des oscillations non linéaires vise à dépasser ce cadre : d'abord de manière très empirique, par des analyses de systèmes individuels comme dans les travaux des ingénieurs André Blondel ou Balthazar van der Pol, puis dans un effort théorique général à la fin des années 1920, avec les travaux de l'école russe de Mandelstam-Andronov. L'historiographie est suffisamment établie aujourd'hui sur ce sujet et la période précédant la seconde guerre mondiale. Pour le reformuler dans notre cadre instrumental, nous dirons que l'analyse des oscillations non linéaires repose sur une instrumentation mathématique dont l'artefact est constitué des mathématiques des systèmes dynamiques, c'est-à-dire pour l'essentiel les travaux d'Henri Poincaré, Alexandre Lyapounov et David Birkhoff, avant les extensions d'Andronov et consorts. Nicolas Minorsky, un des promoteurs de ces théories au fil des années 1940²⁹⁹, oppose même très frontalement l'ancien et le nouveau paradigme des oscillations non linéaires, dans son éloge à Poincaré, écrit en 1954 :

Le mouvement harmonique simple jouait un rôle important dans cette théorie et le principe de la superposition simplifiait pas mal de choses. La présence simultanée de plusieurs oscillations

²⁹⁷ (Campbell et Foster 1931).

²⁹⁸ Pour ne citer que quelques travaux sur le sujet : (Aubin et Dahan 2002; Petitgirard 2004; Dahan Dalmedico 2004; Ginoux 2015).

²⁹⁹ Pour les détails sur la biographie de cet ingénieur-mathématicien du non linéaire : (Petitgirard 2015).

dans un système physique quelconque se ramenait à l'étude de séries trigonométriques, le plus souvent celles de Fourier. [...]

Toutefois, on rencontrait, de temps en temps, des problèmes non linéaires proprement dits, ce qui exigeait l'application de méthodes appropriées à chaque problème particulier, car il n'existait aucune méthode générale susceptible traiter ces problèmes uniformément, comme dans le cas des problèmes linéaires. [...] le coup de grâce à la théorie linéaire a été porté par la découverte des oscillateurs à lampes triodes et c'est le grand mérite de M. Van der Pol d'avoir attiré l'attention sur l'impossibilité de formuler le fonctionnement de ces oscillateurs dans le cadre de la théorie linéaire. [...] Le rôle privilégié et, en quelque sorte, artificiel, joué par l'oscillateur harmonique dans l'ancienne théorie est remplacé maintenant par celui de l'oscillateur à cycle limite qui semble être beaucoup plus approprié à l'étude de phénomènes oscillatoires naturels à l'état stationnaire. [...]

La nouvelle théorie offre un cadre commode pour l'étude d'un grand nombre de phénomènes qui échappaient à l'ancienne théorie linéaire.³⁰⁰

L'« oscillateur à cycle limite » qui remplace l'oscillateur harmonique, les théories qualitatives des équations différentielles de Poincaré, les théories de la stabilité de Lyapounov, tels sont pour Minorsky les ingrédients élémentaires des théories des oscillations non linéaires, loin de l'analyse de Fourier. L'analyse harmonique n'est pas pour autant caduque, puisque l'étude des systèmes linéaires en dépend sur tout le 20^{ème} siècle. Les complications sont ailleurs, dans le calcul et les mesures pratiques des coefficients de Fourier pour les signaux concrets, problématique pour laquelle ont été développés d'autres instruments, très matériels cette fois, pour des signaux de toutes natures.

F. Les « analyseurs harmoniques » et la culture matérielle de l'analyse harmonique

En effet, à côté des méthodes numériques et graphiques, l'analyse harmonique se fait en pratique par de nouveaux moyens matériels dès la fin du 19^{ème} siècle. Ce sont d'abord des procédés mécaniques, le plus célèbre d'entre eux étant l'analyseur harmonique de William Thomson (Lord Kelvin) pour la prédiction des marées. Il a été suivi par une kyrielle d'analyseurs mécaniques de toutes tailles et de précisions relatives à leurs fonctions. Avant que de nouveaux procédés électriques, oscillographiques, optiques offrent des modes d'analyse encore différents, des usages simplifiés, plus spécifiques ou au contraire très génériques.

Nous n'avons pas aujourd'hui de vision d'ensemble de la conception, de la production et de la diffusion de tous ces analyseurs harmoniques³⁰¹. Il existe pourtant une historiographie qui souligne différents aspects de ces développements, une historiographie abondante sur certains dispositifs et très lacunaire sur d'autres. En d'autres termes ce pan de l'instrumentation, qui est très étendu et d'usage courant dans les laboratoires de physique et les industries au 20^{ème} siècle, est très largement méconnu.

Ces analyseurs nous intéressent d'autant plus qu'on les retrouve dans les instruments de Fourier de la cristallographie et de la spectroscopie : les physiciens s'en servent, les adaptent, en inventent de nouveaux – ce qui montre l'épaisseur historique de la culture matérielle de

³⁰⁰ Conférence de Nicolas Minorsky, à la Société des ingénieurs civils, le 18 mai 1954, dans le cadre des célébrations du centenaire de la naissance de Poincaré. Le texte est publié dans le tome 11 des œuvres complètes de Poincaré (p. 120-126).

³⁰¹ Parmi les très rares ouvrages qui abordent la conception des analyseurs spectraux au 20^{ème} siècle, signalons (Escudé et al. 2001).

l'analyse harmonique et ses évolutions jusqu'aux moyens informatiques. Ce qui nous importe ici, dans un bref survol de quelques analyseurs harmoniques, est toujours ce rapport entre les mathématiques de l'analyse harmonique et la conception instrumentale. Ce ne seront donc que quelques exemples, sans rien d'exhaustif, ouvrant des pistes de réflexions pour entrer dans ces cultures matérielles.

1. L'analyseur harmonique de Kelvin

L'analyseur de Kelvin est probablement le plus emblématique de tous les analyseurs harmoniques par son antériorité et sa conception qui sera reprise dans plusieurs lignées d'analyseurs. Il est aussi le plus discuté dans l'historiographie³⁰². Sa conception remonte aux travaux et aux besoins identifiés par le comité de la British Association for the Advancement of Science dédié au sujet suivant : « promoting the extension, improvement, and harmonic analysis of Tidal Observations ». Entre 1867 et 1876, le comité présidé par Thomson a réuni des astronomes, mathématiciens, ingénieurs, calculateurs et officiers de la Royal Navy. L'analyse du phénomène des marées s'inscrit dans un processus d'approfondissement théorique sur le 19^{ème} siècle et d'automatisation du relevé des hauteurs de marées par les marégraphes auto-enregistreurs. Pour l'analyse harmonique de ce phénomène presque périodique, dont les calculs sont quantitativement considérables et coûteux, Thomson a conçu avec son frère un dispositif mécanique : une série de systèmes disque-sphère-cylindre qui réalisent mécaniquement le produit du signal enregistré par une fonction trigonométrique (cosinus ou sinus) et son intégration pour donner chaque composante des marées. C'est une transposition géométrico-mécanique du calcul de coefficient de Fourier à partir d'une fonction : ce mécanisme ingénieux sera l'artefact central de bon nombre d'analyseurs harmoniques pour cette raison.

La recombinaison des composantes harmoniques permet, avec un instrument synthétiseur appelé « prédicteur de marées », de déterminer les marées sur plusieurs jours à partir de l'enregistrement de quelques heures dans un port. Un modèle expérimental est testé en 1873, puis deux analyseurs harmoniques sont effectivement construits, en 1876 avec onze systèmes intégrateurs pour la prédiction des marées, l'autre en 1878 par la firme Munro, avec sept composantes harmoniques.

Les analyseurs harmoniques, inspirés de ce modèle initial, se diversifient dans leur conception et leur utilisation. Une première variante est conçue par Olaus Henrici (1840-1918) en 1893³⁰³, bien plus légère que les systèmes de Kelvin, pour un usage de laboratoire. Il sera fabriqué jusqu'en 1950 par la firme suisse Coradi. Le modèle est perfectionné en ajoutant des intégrateurs, toujours sur l'artefact sphère-cylindre qui agit en module de calcul de coefficient de Fourier, et donc en multipliant les composantes harmoniques analysées simultanément. L'analyseur de Henrici-Coradi standard calcule 30 paires de coefficients, les plus grands modèles sont étendus pour calculer jusqu'à 100 coefficients. Le Henrici-Coradi est utilisé pêle-

³⁰² (Durand-Richard 2016) et les multiples travaux de Marie-José Durand-Richard donnent la meilleure synthèse sur les travaux de Thomson (Lord Kelvin) et son analyseur-prédicteur de marées.

³⁰³ Henrici s'est inspiré de travaux de son collègue mathématicien de l'University College London, William Clifford (1845-1879) et ses représentations graphiques produites par un mouvement cylindrique (Henrici 1894; Clifford 1873). Voir les travaux historiographiques de June Barrow-Green sur toutes ces questions : (Barrow-Green 2017).

mêle dans l'analyse des courants alternatifs, en électrotechnique, en TSF, pour l'analyse des vibrations, en acoustique³⁰⁴, mécanique des matériaux, sismologie, construction navale, etc.

2. Les « synthétiseur-analyseur » mécaniques

La machine de Michelson-Stratton, qui est d'abord un synthétiseur harmonique, est conçue en 1898 et repose un principe différent : un système de ressorts et de câbles réalise des sommes de fonctions trigonométriques, ce qui constitue un artefact différent de l'analyseur de Thomson³⁰⁵. Il n'est pas question ici d'intégrateurs à sphère et disque pour l'analyse harmonique. L'analyse harmonique est opérée selon une voie détournée : les coefficients de Fourier sont calculés de manière approchée, en décomposant la formule d'intégration des coefficients en sommes de Riemann. Cela revient à substituer l'intégrale par des sommes discrètes de valeurs des fonctions sinus et cosinus, ce qui nécessite une analyse numérique spécifique pour déterminer, entre autres, la précision de ces calculs. Le premier instrument de Michelson-Stratton fonctionne avec 20 composantes, le plus avancé des dispositifs comptera 80 composantes. On a vu que Michelson a donné une orientation spectroscopique à cet instrument, mais les fonctions générales de ce synthétiseur-analyseur seront mises à profit au-delà de ce domaine.

Si les systèmes à ressorts sont restés sans suite, du fait des imprécisions inhérentes à cet artefact, l'option de privilégier une machine qui synthétise des harmoniques est suivie dans plusieurs systèmes dont les synthétiseurs de Kranz (1929) et Brown (1939)³⁰⁶. Ce sont des synthétiseur-analyseurs et par conception ils ne dépassent pas 30 à 40 composants trigonométriques dans la synthèse. Le choix est clair : l'instrument doit calculer très rigoureusement les synthèses, ce pourquoi ils ressemblent aux synthétiseurs de Kelvin, c'est-à-dire les prédictors de marée, avec câbles et poulies, plus qu'à ceux de Michelson-Stratton. L'analyse harmonique passe par un calcul numérique approché avec ces synthétiseurs, ramenant les intégrales à des sommes discrètes, du type des sommes de Riemann. Ce qui signifie que l'analyse numérique revient sur le devant de la conception, raison pour laquelle les travaux de Carl Runge³⁰⁷ de 1903 sont d'ailleurs remobilisés pour concevoir les machines.

En d'autres termes, au début du 20^{ème} siècle il existe déjà deux catégories d'analyseurs harmoniques différents dans leur principe : les premiers sont clairement inscrits dans une histoire du calcul analogique direct, utilisant des artefacts géométrico-mécaniques pour réaliser une intégration, et les seconds qui sont des analyseurs harmoniques par calcul approché et assisté par des moyens de calcul analogique de synthèses de Fourier.

S'il s'agit d'approfondir la conception de ces instruments, il faut tenir compte des recompositions d'instruments existants, des multiplications des matérialités auxquelles les concepteurs ont recours, nécessitant à chaque fois une analyse instrumentale et numérique spécifique : les performances, la précision et l'usage sont dépendants de tous ces paramètres.

³⁰⁴ Le physicien américain Dayton Miller (1866-1941) en est un fervent promoteur et utilisateur : (Miller 1916b; Miller 1916a).

³⁰⁵ Le fonctionnement de l'appareil est explicité dans les originaux (Michelson et Stratton 1898a; Michelson et Stratton 1898b) et dans (Bud et Warner (eds.) 1998, p. 305). Voir plus de détails page 93 et suivantes.

³⁰⁶ (Kranz 1927; Brown 1939).

³⁰⁷ (Runge 1903).

Donnons rapidement quelques exemples de ces variantes et systèmes concurrents, en restant dans les matérialités des artefacts mécaniques.

3. De la conception des analyseurs harmoniques mécaniques

Le principal système concurrent de celui d'Henrici-Coradi est l'analyseur harmonique Mader-Ott³⁰⁸. Conçu initialement par Otto Mader (1880-1944), inspiré d'un précédent instrument³⁰⁹ du britannique George U. Yule (1871-1951) il repose sur l'utilisation d'un planimètre d'Amsler : cet instrument permet de calculer analogiquement des aires de surface délimitée par une courbe tracée sur un papier, en suivant la courbe avec le pointeur du planimètre. L'analyseur de Mader trace d'abord la courbe du produit de la fonction à analyser par la fonction sinus ou cosinus, intégrée ensuite grâce au planimètre. Il faut changer les engrenages à chaque composante harmonique, mais plusieurs analyseurs peuvent se monter en série pour opérer l'analyse en une seule fois. Fabriqué initialement par les frères Stärzl, l'analyseur a été produit par l'entreprise Ott à partir de 1929. Léger, rapide, facile d'emploi, peu cher, c'est-à-dire moins cher que la machine Henrici-Coradi surtout, cet analyseur sera fabriqué à plus de 1000 exemplaires, jusqu'en 1972.

Cette fois ce ne sont ni des sphères-cylindres, ni des câbles-poulies, mais des engrenages et un planimètre d'Amsler qui composent l'artefact de cet instrument d'analyse de Fourier. Dans les premières décennies du 20^{ème} siècle ces instruments sont encore conçus en assemblant des organes mécaniques simples, qui reposent sur des principes en nombre très réduit, mais qui sont multipliés dans les instruments. On retrouve l'utilisation d'un planimètre dans l'analyseur de Vannevar Bush en 1920, bien avant ses grands systèmes d'analyseurs différentiels des années 1930³¹⁰. L'analyseur de Charp de 1949 utilise encore des intégrateurs mécaniques à sphère, perfectionnés en un « double-roller integrator », même si l'ensemble de la mécanique d'entraînement est motorisé et le système électrifié³¹¹.

À ces exemples il faut bien sûr ajouter tous les synthétiseurs et analyseurs développés en spectroscopie FTIR et cristallographie. Ce qui donne une idée de la variété des systèmes imaginés, entre fonctions instrumentales spécifiques et dispositifs d'analyse de Fourier très génériques. Ainsi les synthèses de Fourier en deux et trois dimensions correspondent à des besoins très spécifiques de la cristallographie. Mais dans les calculateurs de transformée de Fourier de Strong et Vanasse en FTIR, encore en 1957, les canaux analogiques reprennent le système presque standard et très générique de sphère-disque pour l'intégration³¹².

Enfin pour donner une autre idée de la prégnance des artefacts mécaniques dans la conception des synthétiseurs-analyseurs, nous dirons quelques mots du projet de machine mathématique analogique d'Alan Turing (1912-1954) de 1939³¹³. Turing est resté éminemment célèbre pour ses travaux en logique et sur les premiers calculateurs électroniques, mais ses travaux mathématiques sur l'hypothèse de Riemann sont bien moins connus. C'est un des rares

³⁰⁸ Nous reprenons les termes de l'historiographie à ce sujet : (Durand-Richard; Vietoris 1951).

³⁰⁹ Fabriqué par la *Cambridge Instrument Company*, mais sans succès commercial.

³¹⁰ Voir note 81.

³¹¹ (Charp 1949).

³¹² Voir page 100.

³¹³ Nous reprenons pour l'essentiel les analyses que Léo Corry a consacré dans son article (Corry 2017). Le principal biographe de Turing, Andrew Hodges, rassemble beaucoup des travaux qui sont consacrés à Turing sur son site Web : [URL : <http://www.turing.org.uk/index.html> consulté le 9/04/2019].

sujets mathématiques qui l'a intéressé en dehors de la logique. L'hypothèse de Riemann est la conjecture selon laquelle les zéros non triviaux de la fonction zêta de Riemann sont tous sur la droite $x=1/2$. Turing a imaginé une méthode, et commencé à concevoir en 1939 une machine³¹⁴, pour calculer des valeurs approchées de la fonction zêta de Riemann sur la « ligne critique » $x=1/2$. Il ne pouvait ignorer qu'Edward C. Titchmarsh et J. Leslie Comrie faisaient des calculs pour les valeurs de la fonction zêta depuis 1935, sur des machines mécaniques, dans la lignée des calculs de tables mathématiques et astronomiques. Mais en 1939 Turing a choisi la voie du calcul analogique, très directement inspiré de l'analyseur-prédicteur de marée en fonction à Liverpool. Sa méthode mathématique pour l'exploration des zéros de la fonction zêta repose sur des sommes trigonométriques : la machine analogique, avec ses poulies et son câble pour additionner les composantes trigonométriques semblait la plus adéquate pour calculer ces sommes trigonométriques. Cet épisode est tout à la fois anecdotique, très symbolique et surprenant, car dans ses travaux sur la logique et sur la « machine de Turing universel », tout s'inscrit dans une pensée algorithmique digitale, de la « computation » pas à pas, ce qui est antagonique de la voie choisie par Turing en 1939. Il ne reste rien malheureusement de la machine de 1939, abandonnée avec le début de la guerre.

4. L'électrotechnique et les oscilloscopes

L'historiographie des analyseurs harmoniques a privilégié jusqu'ici le calcul mécanique, à quelques exceptions près comme l'ouvrage très récent d'Aristotle Tympas sur les calculateurs de l'ère pré-électronique³¹⁵. Or à force d'exploration attentive du développement des analyseurs, sur tout le 20^{ème} siècle, il nous est apparu de manière claire que cette histoire n'est qu'un pan des instruments de Fourier employés dans tous les domaines de la science et la technique : il se trouve que les systèmes mécaniques sont même probablement, une minorité parmi la pléiade d'analyseurs harmoniques conçus sur des matériels électriques, oscillographiques, optiques et électroniques. Il serait prématuré d'en faire une présentation globale et synthétique, mais c'est à coup sûr une partie très importante de l'histoire des instruments de Fourier dont il faut dénouer les rapports aux savoirs mathématiques et déterminer en quoi ils se distinguent des systèmes mécaniques.

La problématique technologique du développement des analyseurs harmoniques non mécaniques au 20^{ème} siècle est très fortement liée à une limite des systèmes mécaniques : les opérations à basse fréquence et faible cadence sont mécaniquement faisables, mais dès que des hautes fréquences entrent en jeu, en particulier en télégraphie sans fil et radiodiffusion au début du siècle, le calcul mécanique ne peut pas suivre. Le deuxième point qui paraît essentiel et assez évident est que dans le domaine des courants électriques alternatifs, les ingénieurs vont chercher des solutions électriques à des problématiques d'analyse harmonique, plutôt que de transposer l'analyse en termes mécaniques inopportuns. Toute la révolution industrielle de l'électricité reposant sur la production et la distribution de ces courants alternatifs, l'instrumentation doit s'y adapter, avec ses problématiques spécifiques concernant la fréquence des courants, mais aussi les harmoniques et perturbations à traquer, éliminer ou contrôler. La troisième donnée technologique d'importance, qui est parallèle à ces évolutions, tient au fait que des signaux de toute nature, acoustique, optique, mécanique, etc., sont convertibles et rendus visualisables sous formes de signaux électriques : un instrument d'analyse harmonique de signal électrique est

³¹⁴ Turing n'a que très peu publié à ce sujet (Turing 1945; Turing 1953).

³¹⁵ Il consacre un chapitre aux analyseurs, incluant les analyseurs électriques : « Like the poor, the Harmonics will always be with us » dans (Tympas 2017).

potentiellement un instrument générique d'analyse. L'électronique, analogique et numérique, ne peut traiter que des signaux convertis en courants électriques. Avant le plein développement de l'électronique numérique, les mesures se font directement sur les signaux électriques, en termes de traitement analogique du signal. Les rapports aux savoirs mathématiques ne sont pas *a priori* du même niveau dans le cadre analogique et numérique, ce qui sera considérablement renforcé avec la FFT qui s'imposera comme moyen algorithmique de faire de l'analyse harmonique par voie électronique numérique.

La conception de ces analyseurs harmoniques est un travail d'ingénieur de l'électrotechnique et de l'électronique. Jusqu'à aujourd'hui nous ne sommes pas encore rentrés suffisamment dans les laboratoires et dans l'industrie pour rendre compte des travaux des concepteurs et des modes d'utilisation de ces analyseurs harmoniques, au quotidien. Documenter l'histoire de ces analyseurs demande également un travail spécifique d'exploration de revues spécialisées³¹⁶. Car même si nos recherches dans les revues généralistes comme le *Journal of scientific instruments* et la *Review of scientific instruments* ont permis de distinguer des analyseurs harmoniques « génériques », on se retrouve, dans les revues spécialisées, face à un foisonnement d'analyseurs dont la catégorisation s'annonce beaucoup plus complexe que celle des analyseurs mécaniques : des principes et des matérialités diverses, qui peuvent s'hybrider, et des savoirs mathématiques encore spécifiques. Le vertige donné par ce foisonnement est amplifié par la fréquentation des collections techniques et des catalogues de constructeurs³¹⁷.

Il faudrait *a minima* poser le premier jalon de cette histoire au niveau des inventions de deux pionniers de l'oscillographie, les ingénieurs André Blondel (1863-1938) et William Duddell (1872-1917), dans le contexte du développement de l'électrotechnique industrielle³¹⁸. En 1893 le principe de l'oscillographe de Blondel³¹⁹ est une technique d'analyse harmonique qui est fondée sur un filtrage par différents circuits résonants. L'analyse harmonique est faite séquentiellement en soumettant le courant à différentes fréquences de résonances possibles³²⁰. Dans son principe, cette analyse harmonique n'a rien à voir avec les calculs de coefficients de Fourier des systèmes mécaniques. Même si au fond tout repose sur le paradigme de l'analyse harmonique et la possible décomposition des oscillations électriques en sinusoïdes harmoniques. Blondel est l'inventeur de multiples oscillographes, analyseurs harmoniques, analyseurs spectraux et d'un « harmonigraphe », jusque dans les années 1930³²¹. Beaucoup sont

³¹⁶ Impossible d'être exhaustif sur ces revues, mais à titre indicatif, nous avons consulté : parmi les revues françaises, *L'électricien* (éditée sur la période 1881-1973), *La revue générale de l'électricité* (édité sur 1917-1995) ; et sinon le *Journal of the Institution of Electrical Engineers* (1889-1963).

³¹⁷ Le Musée des arts et métiers possède une collection de catalogues de constructeurs remarquables (une partie est consultable sur le Cnum : http://cnum.cnam.fr/thematiques/fr/9.catalogue_de_constructeurs/cata_auteurs.php consulté le 8/04/2019).

³¹⁸ V.J. Philips dresse un panorama de la préhistoire de l'oscillographie dans son ouvrage *Waveforms* (Phillips 1987).

³¹⁹ Le premier oscillographe bifilaire de 1893 ne permet d'étudier que des oscillations électriques lentes (Blondel 1893). Il est perfectionné progressivement par (Duddell 1897) et (Blondel 1902), pour un usage plus général.

³²⁰ Le principe reprend en quelque sorte l'analyse du son faite avec les célèbres résonateurs de Koenig et Helmholtz (Bud et Warner (eds.) 1998, p. 309).

³²¹ (Blondel et Carbenay 1917; Blondel 1925).

des systèmes électromécaniques, concurrencés par les tubes de Braun qui ouvrent le chapitre de l'oscilloscopie et ses évolutions vers l'électronique³²².

Les principes électromécaniques de mise en œuvre de ce type d'analyse harmonique sont diversifiés et parfois même surprenants. Dans l'« Electric harmonic analyser » de 1925, par exemple, conçu autour du Technology College de Manchester et de Miles Walker³²³, le courant à analyser passe dans la bobine d'un dynamomètre adapté pour l'occasion, pendant que le courant de référence calibré en fréquence circule dans une seconde bobine à l'autre extrémité du dynamomètre : les valeurs des coefficients de Fourier du courant analysé sont lues sur les variations du dynamomètre, lequel mesure les différences des forces exercées par les courants entre les deux extrémités.

Parmi les analyseurs génériques, mais orientés par un usage initial en cristallographie, on peut mentionner le système Hagg-Laurent³²⁴, modèle repris et adapté dans de nombreux synthétiseurs et analyseurs harmoniques après 1946. Sous certains aspects il rappelle les systèmes électriques d'A. Beevers développés en 1939-42 avec McEwan³²⁵. Le système Hagg-Laurent additionne des courants alternatifs, qui sont des tensions sinusoïdales. Les valeurs de la courbe à analyser sont entrées dans le dispositif par l'intermédiaire de potentiomètres : chacun prend la valeur d'un point de la courbe, qui est envoyée par des transformateurs électriques comme facteur des sinusoïdes à synthétiser. Étant entièrement électrique la réponse est pratiquement instantanée. L'instrument permet d'obtenir des harmoniques jusqu'à l'ordre 16. Le principe est repris et perfectionné dans plusieurs modèles d'instruments comme ceux de V. Frank et P.B. Braun en 1958³²⁶.

5. Les nouvelles données techniques de l'électronique

Avec l'essor de l'électronique et de la radiotechnique, les données et les problématiques techniques vont encore changer, et évoluer considérablement après la seconde guerre mondiale. En voulant expérimenter et concevoir des systèmes techniques toujours plus performants, les ingénieurs et les physiciens vont se frotter à des signaux de plus en plus complexes, avec des exigences d'analyse et de traitement sans précédent : les transmissions en radio ou téléphonie longue distance sont sujettes à des déformations de tous ordres en intensité, en déphasage, de manière non uniforme sur les fréquences, etc. Les amplificateurs électroniques sont sujets à un bruit de fond électronique incontournable appelé « bruit de grenaille », qui est lié à la nature discontinue, quantique, de l'électricité et qui s'ajoute aux signaux. La détection radar, les écoutes sous-marines soulèvent de redoutables problèmes de traitement du signal. Analyser les signaux, traiter les signaux, pour améliorer le rapport signal sur bruit, sont les nouveaux maître mots et des défis tout autant théoriques que pratiques.

Dans ces transformations, les instruments de l'analyse harmonique changent, les savoirs mathématiques encapsulés également. L'analyse harmonique s'intéresse aux phénomènes

³²² Les oscillographes enregistrent des courbes, les oscilloscopes permettent de visualiser les courbes sur l'écran du tube. Dès 1897, Ferdinand Braun est le principal instigateur des oscilloscopes à tube (K.F. Braun 1897). Voir la variété d'usage de oscillographes dans (Wood 1925).

³²³ (Cockcroft et al. 1925).

³²⁴ (Hagg et Laurent 1946).

³²⁵ Voir page 148.

³²⁶ « A Fourier analogue-computer of the Hagg-Laurent type » (Frank 1957) ; l'instrument de Braun est décrit en annexe du *Philips Research Report* (P.B. Braun 1957). On trouve encore d'autres variantes dans (Ramsay, Lipson et Rogers 1952; Azaroff 1954; Mohanti et Booth 1955).

périodiques, aux phénomènes transitoires et surtout, de plus en plus, aux signaux bruités par une composante aléatoire.

Même s'il est difficile de distinguer les évolutions progressives des bouleversements vraiment radicaux, plusieurs paramètres changent résolument avec la seconde guerre mondiale. Le premier tient aux problématiques scientifiques et techniques très nouvelles liées au radar, aux télécommunications de masse et aux problèmes des calculateurs électroniques, autant de domaines effectivement bouleversés durant le conflit. Le second correspond aux notions et nouveaux concepts introduits dans les années 1940 et qui s'imposent dans le paysage technologique : théorie de l'information, traitement du signal, analyse spectrale. Dans ce paysage se pose la question de cerner ce que serait une analyse harmonique de signaux aléatoires et quels instruments, mathématiques et matériels, permettent de la concrétiser. Le troisième plan, plus directement associé aux instruments de Fourier, est celui de l'évolution rapide vers des artefacts dont la matérialité est prioritairement soit électronique, soit optique.

En les réarticulant avec quelques éléments historiographiques et résultats d'explorations récentes qui restent sommaires, nous allons nourrir encore ces interrogations selon trois axes thématiques : les évolutions des mathématiques de l'analyse harmonique et leur progressive instrumentalisation ; une brève histoire de l'optique de Fourier, qui apparaît dans les études de cas ; et nous terminerons par questionner l'émergence, les origines et la diffusion de la FFT, point de fuite de toutes les perspectives dessinées par les évolutions des instruments de Fourier évoquées jusqu'à présent.

G. Les mathématiques de l'analyse harmonique après 1930

Le cadre mathématique de l'analyse de Fourier a été une lente maturation de concepts au 19^{ème} siècle depuis le traité de Fourier de 1822. Nous avons indiqué succinctement que ce cadre était en transformation au cours des années 1930, dans un mouvement de généralisation et d'abstraction croissante de l'analyse harmonique.

1. La « Generalized harmonic analysis » de Norbert Wiener

Nous allons maintenant préciser les voies de cette généralisation, en nous focalisant sur la figure de proue de ce renouveau, le mathématicien Norbert Wiener, dont on a pu souligner la présence répétée dans les études de cas préliminaires sur les instruments de Fourier. Wiener est un promoteur essentiel de l'analyse harmonique « généralisée », qui donne son titre à l'article majeur de 1930 dans la revue *Acta Mathematica* : « Generalized harmonic analysis »³²⁷. Pesi Masani étant probablement le meilleur biographe de Wiener, nous nous appuierons sur ses analyses, ainsi que les travaux de Jean-Pierre Kahane, pour l'essentiel³²⁸.

Les idées mathématiques originales de Wiener qui ont précédé et présidé à son analyse harmonique trouvent leur origine dans l'analyse du mouvement brownien, entamée vers 1920 : de ce type de mouvement aléatoire connu en physique théorique, Wiener va faire un concept à part entière et l'archétype du processus stochastique idéalisé³²⁹. Le mouvement brownien mathématisé par Wiener devient un instrument de modélisation de différents phénomènes, comme le « bruit de grenaille », ce bruit électronique observé dans les tubes électroniques utilisés pour l'amplification des signaux. Wiener dans les années 1920 n'a encore qu'une écoute

³²⁷ (Wiener 1930).

³²⁸ (Masani 1990; Kahane 1998; Kahane 1966; Pier 1990).

³²⁹ (Wiener 1921).

timide des mathématiciens. C'est à la faveur de la dissémination des théories des probabilités de Richard von Mises (1883-1953) et Andreï Kolmogorov (1903-1987) que l'intérêt pour le mouvement brownien idéalisé de Wiener gagne sa place parmi les mathématiciens.

L'ambition de Wiener est de généraliser les notions de l'analyse harmonique classique, qu'il considère centrale de la mathématisation de la physique depuis le 19^{ème} siècle, pour les processus stochastiques³³⁰. Cet effort signe l'intérêt constant du mathématicien Wiener pour les travaux des physiciens et des ingénieurs, tout au long de sa vie³³¹. Pour façonner cette nouvelle analyse harmonique Wiener est confronté à un premier problème : dans le cas des processus stochastiques, les classes de fonctions habituelles, celles qui ont des séries et intégrales de Fourier convergentes, ne sont pas directement utilisables. Le mouvement brownien idéalisé est un guide pour Wiener, qui élabore son analyse harmonique en partant de plusieurs autres considérations issues de la physique, dans des chapitres plus confidentiels des travaux de Lord Kelvin, Lord Rayleigh, Arthur Schuster (1851-1934) ou encore Geoffrey I. Taylor (1886-1975)³³². Tous ces physiciens ont fait des tentatives d'analyse harmonique de phénomènes aléatoires en optique, acoustique, mécanique des fluides, turbulence. Wiener aboutit à une définition de transformée de Fourier généralisée et un centrage sur la notion de distribution spectrale du signal. C'est ce qui lui permet d'échafauder un cadre théorique et mathématique adéquat. Toujours en 1930, Wiener démontre un résultat qui, une fois intégré dans l'instrumentation, s'avèrera capital : la densité spectrale de puissance d'un processus stochastique est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation de ce processus. Il est connu sous le nom de théorème de Wiener-Khintchine, car démontré indépendamment par Alexandre Khintchine (1894-1959) en 1934.

Dans son ouvrage de 1933, *The Fourier integral and certain of its applications*, Wiener concentre les notions et les résultats qui feront le succès de ce nouveau cadre mathématique, auprès des physiciens et des ingénieurs : l'intégrale de Fourier généralisée, la notion de densité spectrale de puissance et le théorème de Wiener(-Khintchine). Wiener introduit à dessein la notion de « spectre » dans l'analyse mathématique :

Physically speaking, this is the total energy of that portion of the oscillation $x=f(t)$ lying within the interval in question, x being taken to be a displacement and t the time. As $\sigma(u)$ determines the energy-distribution of the spectrum of $f(x)$, we may briefly call it the "spectrum" of $f(t)$.

³³⁰ Masani explicite la pensée de Wiener que nous résumerons ainsi : depuis les conceptions en termes de « champ » de la physique du 19^{ème} siècle, héritière de Lagrange, Faraday et Maxwell, les actions se propageant de manière continue, déterministe, les phénomènes sont formalisables en termes d'équation aux dérivées partielles dans l'espace-temps. De l'hypothèse d'uniformité des lois de la nature, il découle que les équations sont invariantes du temps et des translations spatiales (ce qui prévaut ici et maintenant, vaut pour tout autre lieu et temps) : les coefficients des équations ne dépendent donc pas de la variable temps. Enfin, ces équations peuvent se considérer dans l'approximation linéaire si le phénomène étudié est généré par de petites perturbations autour d'un point d'équilibre. Dans ce cas, l'équation correspond à un opérateur linéaire, pour lequel l'analyse harmonique de Fourier est excessivement centrale et importante. (Masani 1990, p. 99).

³³¹ Norman Levinson (1912-1975), élève puis collègue de Wiener au MIT, le formule ainsi : « Most of Wiener's important work was inspired by physics or engineering and in this sense he was very much an applied mathematician. He formulated his theories in the framework of rigorous mathematics and as a consequence his impact on engineering was very much delayed. » (Levinson 1966, p. 15-16).

³³² Les interactions scientifiques entre Taylor et Wiener sont très riches, elles sont connues : (Battimelli 1986). La meilleure analyse récente de ces théorisations statistiques de la turbulence, dans les années 1930 tout particulièrement, se trouve dans les travaux d'Antonettia Demuro et sa thèse sur un autre mathématicien-physicien, spécialiste de la turbulence, Joseph Kampé de Fériet : (Demuro 2018).

*The author sees no compelling reason to avoid a physical terminology in pure mathematics when a mathematical concept corresponds closely to a concept already familiar in physics.*³³³

Ce bref cheminement dans l'œuvre de Wiener permet de donner plus de sens à ses échanges avec Arthur Patterson, de passage au MIT vers 1933, et les résultats qui en découleront pour la cristallographie par diffraction de rayons X après 1934. Wiener nourrit aussi une fascination pour l'interféromètre de Michelson, son « instrument scientifique fétiche » selon Masani. En déplaçant le miroir mobile de l'interféromètre, il est possible de réaliser une autocorrélation du signal lumineux d'entrée. Aux yeux de Wiener, c'est un calculateur analogique qui calcule la fonction d'autocorrélation. Ce n'est qu'un aspect du dialogue fructueux entretenu par Wiener entre théories optiques et mathématiques de l'analyse harmonique. Wiener s'est aussi intéressé à la notion de cohérence des signaux lumineux, élaborant les premières théories modernes de la cohérence de la lumière. Dans les termes de Wiener, la lumière a une origine chaotique, c'est un processus stochastique, pour lequel les outils de l'analyse harmonique généralisée sont pertinents. Wiener pose une pierre dans la théorie de la cohérence optique, qui prendra un sens plus affirmé avec l'arrivée des lasers, dans les années 1960.

L'œuvre mathématique de Wiener est considérable et il a tenté de l'orienter au service d'une instrumentation opérationnelle en physique et pour les ingénieurs. En d'autres termes, Wiener participe pleinement de la mise en instruments de ses résultats mathématiques, considérant en fait dès le départ les mathématiques comme instrument. Wiener élabore ses mathématiques en partant de questions de la physique et des ingénieurs, il perfectionne ses notions, ses théorèmes, généralise ses résultats, comme des instruments qu'on affûte. Il est le premier à le faire à partir de ses propres résultats, mais la mise en instruments de l'analyse harmonique généralisée est un processus de long terme, mobilisant bon nombre d'autres acteurs avec lui et après lui. On peut faire un parallèle avec les travaux publiés par Fourier en 1822 mais mûris et améliorés sur un siècle, et les travaux de Wiener des années 1920 qui seront eux aussi instrumentalisés en quelques décennies.

Les travaux les plus emblématiques de Wiener sont liés à son implication dans les recherches américaines durant la seconde guerre mondiale, sur le problème de la conduite de tir de DCA. Ces travaux et leurs suites ont été déjà analysés à de nombreuses reprises par Pesì Masani, Peter Galison, Jérôme Segal et David Mindell pour ne citer qu'eux³³⁴. À partir de 1941 Wiener porte un projet d'« Anti-Aircraft Predictor »³³⁵ qui vise la conception d'un appareil pour suivre les avions, prédire leur trajectoire et commander le tir de DCA en fonction. Tout repose sur les séries de données recueillies sur la position de l'avion. Wiener introduit le terme de *time serie*, série temporelle, pour désigner la fonction du temps correspondant à ces mesures. Filtrage de série et extrapolation sont les clés mathématiques élaborées pour sa théorie de la prédiction, qui est fondamentalement une analyse statistique des séries. Ses recherches de guerre sont la matrice de ses travaux très connus : la cybernétique, comme théorie générale de la communication et la commande, publiée sous forme de traité de 1948, et l'ouvrage fondamental consacré à l'analyse des séries temporelles en 1949, *Extrapolation, interpolation, and*

³³³ (Wiener 1933, p. 163).

³³⁴ (Masani 1990, p. 181; Galison 1994; Segal 2003; Mindell 2003).

³³⁵ Au sein du National Defense Research Committee (NDRC) créé pendant la guerre pour coordonner les recherches de guerre, et dont la section « Fire control » est dirigée par Warren Weaver.

*smoothing of stationary time series: with engineering applications*³³⁶, qui est une version publique des rapports écrits durant la guerre.

Les parallèles avec les recherches de l'ingénieur mathématicien Claude Shannon ont été largement discutés dans l'historiographie également. Shannon est impliqué lui aussi dans les recherches de guerre au sein des Bell Labs, sur le tir de DCA d'abord puis sur la cryptologie : ses recherches, entre théorie du codage et de la communication, seront la matrice de son célèbre traité de 1948 sur la théorie mathématique de la communication. Shannon pose, entre autres, une définition statistique de la notion d'information, qui est parallèle aux notions introduites par Wiener sur les statistiques des séries temporelles. Ces travaux de Shannon et Wiener marquent un rapprochement entre l'ingénierie de la communication et les sciences statistiques. Les statistiques des séries temporelles deviennent un objet de recherche et un instrument pour l'ingénierie des communications, manifestant les soucis d'une pratique très instrumentale des mathématiques.

De la « Generalized harmonic analysis » à son traité sur l'intégrale de Fourier et aux séries temporelles, Wiener cherche à concrétiser un dialogue entre les savoirs mathématiques en construction et le monde des physiciens et des ingénieurs. Les modalités et les temporalités de ce processus constituent une problématique de recherches épistémologiques et historiques, sur la période 1930-1960, dont la résolution permettrait d'éclairer sous de nouveaux angles la fabrique des instrumentations de la FTIR et de la cristallographie. Pour tenter de qualifier plus précisément les enjeux et la nature de ce processus, transportons-nous 30 ans plus tard, en 1961, dans le traité du physicien français Jacques Arsac : *Transformation de Fourier et théorie des distributions*.

2. Transformation de Fourier et théorie des distributions – Jacques Arsac, 1961

Ce choix de traité se rapporte tout d'abord au constat que la transformée de Fourier a acquis, au tournant de 1960, un nouveau statut et devient le sujet central de plusieurs ouvrages : des cours du mathématicien Laurent Schwartz (1915-2002) comme ses *Méthodes mathématiques de la physique* datant du début des années 1950, à l'ouvrage du radioastronome Ronald Bracewell (1921-2007) de 1965, réédité plusieurs fois et diffusé largement, *The Fourier transform and its application*³³⁷. Chronologiquement situé entre les deux, l'ouvrage d'Arsac a le mérite d'être remarquablement synthétique et de fixer un état de l'art en 1961. Il aborde les questions théoriques sur la transformée de Fourier et son rapport au cadre généralisé de la théorie des distributions élaborée par Laurent Schwartz vers 1950³³⁸, et aussi les questions les plus pratiques concernant les instruments en spectroscopie, cristallographie et radioastronomie, c'est-à-dire l'étude des sources radio dans l'univers. En 1961, Jacques Arsac (1929-2014) est

³³⁶ (Wiener 1948; Wiener 1949).

³³⁷ (Schwartz 1955; Schwartz 1956; Bracewell 1965). Pour le parcours de R. Bracewell, (Frater, Goss et Wendt 2017; Sullivan (ed.) 1984).

³³⁸ Rappelons que Schwartz a obtenu la Médaille Fields en 1950 pour ses travaux sur la théorie des distributions. Sur l'élaboration de la théorie des distributions de Schwartz, et son rapport à l'analyse harmonique, voir les travaux d'Anne-Sandrine Paumier (Paumier 2014; Paumier 2016) ainsi que (Lützen 1982). Dans son cheminement théorique, dès 1945, Schwartz pose comme contrainte dans sa théorie des distributions, le fait que la transformée de Fourier ait un sens mathématique pour ces distributions (et il y parvient avec la notion de distribution « tempérée » aussi appelée « distributions sphériques » dans les termes de Schwartz à ce moment-là). Il le fait d'ailleurs comme d'autres avant lui qui ont cherché à généraliser la notion de transformée de Fourier.

un radioastronome, comme Ronald Bracewell, travaillant à l'Observatoire de Meudon. L'ouvrage est écrit en français, à destination d'un public restreint, mais nous avons une meilleure connaissance de son contexte d'écriture. Il est traduit en 1966 en anglais.

Avant de discuter du contenu de l'ouvrage, un éclairage sur le parcours de Jacques Arsac nous paraît nécessaire. C'est un physicien formé à l'astrophysique et à la radioastronomie, à l'Observatoire de Meudon³³⁹. La thèse d'Arsac soutenue en 1956 porte sur l'« étude théorique des réseaux d'antennes en radioastronomie et réalisation expérimentale ». Arsac étudie les antennes en introduisant les techniques de l'interférométrie, s'inscrivant ainsi dans une tradition de l'optique interférométrique en France qu'il adapte aux signaux radio, en l'occurrence, des ondes hertziennes centimétriques. Arsac, inspiré par les travaux de Pierre-Michel Duffieux, mobilise les ressources de l'optique théorique à base de transformée de Fourier, en étant très tôt confronté aux calculs numériques : car comme en spectroscopie FTIR, les observations interférométriques en radioastronomie donnent la transformée de Fourier de la répartition de la source observée.

En 1959, il fonde et dirige le Centre de calcul électronique de l'Observatoire de Meudon, construit à la diligence du directeur André Danjon (1890-1967) et dont le pivot est l'achat d'un ordinateur IBM650. Il devient en 1963 directeur de l'Institut de Programmation de Paris et toute sa carrière se fera par la suite dans l'informatique à l'université. Arsac est un promoteur infatigable d'une science informatique comme discipline autonomisée des mathématiques, dont il s'attache à définir les fondements épistémologiques. Son manifeste de 1970, *La science informatique*, inspirera les réformes institutionnelles dans l'enseignement supérieur et au CNRS³⁴⁰. L'ouvrage de 1961 est un jalon intermédiaire dans le parcours d'Arsac et un jalon de l'histoire de l'instrumentation de Fourier en France. Il est écrit par un instrumentaliste de la radioastronomie, en conversion vers l'analyse numérique et qui deviendra un informaticien de premier plan.

Arsac choisit d'écrire un ouvrage qui se positionne entre les livres de mathématiques très documentés, dominés par les soucis de rigueur et de généralité, et les livres à l'usage des physiciens, où prévalent au contraire les préoccupations de simplicité et d'efficacité. C'est sur ce point qu'il se distingue des cours de Schwartz par exemple. Il souhaite clarifier « l'outil mathématique » de la transformation de Fourier, selon le titre de la première partie de l'ouvrage, et ses multiples utilisations en physique. Ces quelques mots d'Arsac permettent de situer le caractère instrumental de la transformée de Fourier dans les expériences et instruments de la physique, partant de son expertise en radioastronomie :

Elle joue en effet un grand rôle dans l'interprétation du mécanisme fondamental des observations : elle permet de décrire les relations entre l'image obtenue et l'objet observé, ou entre le signal et la réponse donnée par un amplificateur auquel il parvient. Ce second problème est étudié depuis longtemps ; les travaux de Heaviside apparaissent maintenant comme une étonnante préfiguration des techniques reposant sur la transformée de Laplace. Le premier a été étudié en détail par les opticiens, et de grands progrès ont été accomplis depuis l'introduction de l'utilisation de la Transformation de Fourier par P.M. Duffieux.

³³⁹ Il entre au sein du service de radioastronomie de Jean-François Denisse (1915-2014) établi en 1950. C'est un service d'observation mis en place par Yves Rocard (1903-1992) et qui participera au développement de la grande station radio-astronomique de Nancay.

³⁴⁰ Sur l'ouvrage (Arsac 1970), sur la carrière d'Arsac et les évolutions institutionnelles, voir les travaux de Pierre-Eric Mounier-Kuhn (Pierre Mounier-Kuhn 2010).

L'extension de cette technique à la radio-astronomie a été acquise en 1955 [...]. D'autre part, les problèmes de fluctuations et bruit de fond ont joué un rôle beaucoup plus grand en radio-astronomie que dans les techniques voisines, optique notamment, et leur étude utilise un théorème important de Kintchine reposant sur la Transformation de Fourier. La radio-astronomie se trouvait ainsi utiliser constamment cet outil mathématique.³⁴¹

En quelques lignes Arsac convoque la transformée de Fourier utilisée en optique et radioastronomie, le calcul opérationnel de Heaviside, les généralisations de ces opérations aux problèmes de fluctuations et le théorème de Khintchine (qui est appelé plus communément Wiener-Khintchine). Le traité mériterait une longue analyse pour rendre compte de son ampleur et de son ambition. Nous n'en donnerons que quelques aspects très succincts dans ce mémoire pour alimenter notre problématique de recherche sur l'histoire des instruments de Fourier.

Le premier point, qui donne le titre à l'ouvrage, est la spécification, à destination des physiciens, du cadre généralisant la transformée de Fourier aux distributions de Schwartz³⁴² lesquelles sont une généralisation de la notion de fonction mathématique. La notion de distribution a émergé des tentatives de construire une justification mathématique aux travaux des physiciens Oliver Heaviside (1850-1925) et Paul Dirac (1902-1984) : le calcul opérationnel très heuristique de Heaviside était d'usage courant en physique, et Dirac avait introduit la « fonction delta » pour les besoins de la mécanique quantique en 1926³⁴³. Produit de distributions, dérivation de distributions, transformée de Fourier, tous les instruments mathématiques sont détaillés dans l'ouvrage d'Arsac. Et parmi eux une opération va s'avérer centrale, celle de convolution.

Le deuxième aspect porte sur la troisième partie de l'ouvrage, composée de trois chapitres sur les « filtres linéaires » dans une perspective d'analyse harmonique des processus aléatoires. Arsac fait directement référence aux travaux du physicien André Blanc-Lapierre (1915-2001), en particulier son ouvrage de 1953 co-écrit avec le probabiliste Robert Fortet (1912-1998) la *Théorie des fonctions aléatoires*³⁴⁴. L'importance de la notion de filtre linéaire tient au fait que « tous les moyens d'observation sont, à une approximation plus ou moins bonne, des filtres linéaires »³⁴⁵. En suivant Arsac, dans les conditions de linéarité, un instrument d'observation réalise un opérateur de convolution. Le signal de sortie $s(x)$ d'un appareil $A(x)$ est relié au signal d'entrée $e(x)$ par l'opérateur :

$$s(x) = e(x) * A(x)$$

où A , e et s sont des fonctions ou des distributions, et l'opérateur de convolution est

$$h = f * g$$

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(x-t)dt$$

Le cadre mathématique mit en place assure plusieurs choses : le sens mathématique à donner à ces termes, d'une part, et, d'autre part, leur caractère très général puisqu'il n'est pas question d'une instrumentation physique en particulier. Ce cadre sert également à réintroduire

³⁴¹ (Arsac 1961, p. vii)

³⁴² Voir note 338.

³⁴³ La fonction qui vaut zéro pour tous les nombres réels, mais prend une valeur infinie à l'abscisse zéro, et dont l'intégrale vaut 1. Aucune fonction mathématique, avant les concepts introduits par Sergueï Sobolev (1908-1986) en 1936 et systématisé par Schwartz en 1950, ne pouvait posséder de telles propriétés.

³⁴⁴ (Blanc-Lapierre, Fortet et Kampé de Fériet 1953).

³⁴⁵ (Arsac 1961, p. 251).

la transformée de Fourier comme instrument central de l'analyse instrumentale : en effet l'intérêt de la transformée de Fourier réside dans le fait qu'elle échange le produit de convolution sur les fonctions et le produit simple sur les transformées de ces fonctions. Plutôt que de traiter le problème de la convolution directement, un passage dans le domaine spectral par transformée de Fourier devient, en principe, plus simple.

Enfin, appuyé par les résultats sur les fonctions aléatoires et les travaux de Wiener, Arsac indique l'instrument mathématique permettant d'obtenir une fonction certaine pour un processus aléatoire : étudier la répartition spectrale de l'énergie du processus aléatoire, c'est-à-dire la répartition de l'énergie sur les différentes fréquences composant le signal, en utilisant la formule d'autocorrélation et le théorème de Wiener-Khintchine. En 1961, l'analyse harmonique généralisée et l'analyse spectrale sont devenues des instruments très opératoires pour la physique, à condition de savoir calculer des transformées de Fourier.

Le troisième aspect que nous soulignerons, c'est le chapitre 12 dédié aux problèmes de calcul numérique liés à l'utilisation de la transformée de Fourier. Quand le bel outil de recherche doit devenir un outil de calcul effectif, les complications pratiques se multiplient.

Si en fait on n'y était pas contraint par certains problèmes de la physique, nous pensons que le passage par une T.F. pour le calcul numérique d'un problème risquerait souvent d'être nuisible. [...] Mais il se trouve que certains procédés d'observation en physique fournissent non la fonction dont la mesure est le but final de l'expérience, mais sa T.F. ou plus exactement des renseignements sur sa T.F.³⁴⁶

La mesure interférométrique de la répartition de luminance sur les radiosources en radio-astronomie fournit non la répartition de luminance elle-même mais un certain nombre de valeurs de sa T.F. voire seulement des valeurs du module de sa T.F. [...] La spectroscopie interférentielle amène à connaître non la répartition spectrale de la lumière analysée, mais sa T.F. sur un intervalle de longueur finie. [...] Nous avons vu l'importance de la fonction de filtrage des fréquences d'espace en optique. Cette fonction est difficile à mesurer directement, et une des meilleures manières de la connaître est souvent de la déduire de la fonction de diffusion observée par une T.F. [...] Citons encore la détermination de la structure de la matière cristalline par diffraction des rayons X qui fournit le module de la T.F. à trois dimensions de la distribution de matière ; signalons que dans ce cas-là l'unicité de la solution du problème n'a pas encore pu être établie mathématiquement.³⁴⁷

Arsac détaille principalement une méthode de calcul très orientée par le calcul électronique digital, qui correspond à sa pratique instrumentale à l'Observatoire de Meudon, s'efforçant d'indiquer l'analyse numérique adéquate. Selon ses termes, il faut « organiser » le calcul pratique d'une transformée de Fourier. La méthode numérique d'Arsac repose sur l'égalité dite « formule de Poisson » et les propriétés des formules des transformées de Fourier, pour la translation et l'homothétie. Elle vise à approcher le calcul de la valeur des transformées point par point. La problématique du calcul pratique est double car la fonction dont il faut calculer la transformée est le résultat d'une mesure, sur un ensemble fini et discrétisé de points : cela contraint fortement la manière de calculer et demande d'évaluer les approximations cumulées, dans une analyse numérique rigoureuse. Outre la maîtrise de ces approximations, le calcul pratique doit aussi organiser les tables des valeurs des fonctions sinus et cosinus, ce qui suppose une capacité de stockage suffisante. Et pour les valeurs qui ne se trouvent pas dans les

³⁴⁶ (*Ibid.*, p. 316).

³⁴⁷ (*Ibid.*, p. 317).

tables, il faut ajouter des procédures d'interpolation entre valeurs, ou des algorithmes de calcul rapide de ces valeurs.

La méthode d'Arsac est ingénieuse, inventive car il faut l'être : les méthodes numériques de Carl Runge, datant du début du 20^{ème} siècle, ne sont plus adaptées à l'ère numérique. Janine Connes, dans sa thèse sur la spectroscopie FTIR, utilisera d'ailleurs une méthode proche de celle d'Arsac. La seule lecture du traité d'Arsac n'indique cependant pas les autres méthodes de calcul existantes. Ce n'est qu'une des nombreuses interrogations qui sont désormais en suspens concernant les 30 années passées depuis les travaux de Wiener. Comment comprendre que la « Faltung », balbutiante et à peine abordée par les mathématiciens en 1930, s'impose sous le terme commun de convolution au cœur de la pensée des instruments de la physique dans les années 1960 ? La transformée de Fourier est une notion généralisée aux distributions et aux processus stochastiques, constituant des acquis qui semblent très clairs en 1961. Si plusieurs mathématiciens, de Wiener à Schwartz, ont échafaudé ces extensions des transformées de Fourier³⁴⁸, les rapports entre les notions mathématiques en jeu, les théories physiques et les réalisations des multiples instruments matériels, omniprésents dans l'ouvrage d'Arsac, sont loin d'être connus. Notre exploration des communautés instrumentales de l'analyse spectrale peut nous donner quelques indices, mais ces indices ne suffisent pas à construire une trame solide pour analyser les rapports en question. Parmi ces indices, nous en pointerons deux. Le premier nous renvoie, une nouvelle fois, aux collaborations de Wiener avec les ingénieurs au MIT, et avec V. Bush tout particulièrement. Dans les années 1920, Wiener et Bush reprennent les travaux d'Heaviside de la fin du 19^{ème} siècle sur le calcul opérationnel : Wiener jette de nouvelles bases mathématiques à ce calcul, à partir de l'analyse harmonique et des transformées de Fourier. Bush reprendra ce cadre, traduit à destination de ses élèves en ingénierie électrique au MIT et publié en 1929 dans l'ouvrage très influent *Operational circuit analysis*³⁴⁹. Cette collaboration constitue un jalon dans la diffusion et la généralisation du calcul opérationnel parmi les ingénieurs. Les résultats de Wiener sont également un jalon entre les notions d'opérateurs définies de manière plutôt heuristique par Heaviside à la fin du 19^{ème} siècle et la théorie des distributions de Schwartz. C'est ce qui explique sans doute l'importance accordée par Arsac aux travaux de Heaviside, remis en perspective de la théorie des distributions et utilisés dans le cadre des développements instrumentaux en physique.

Le second indice nous paraît révélateur des circulations de savoirs à l'échelle de la France, mais dont la portée au-delà de ces frontières nous est inconnue : il s'agit des travaux du physicien et mathématicien André Blanc-Lapierre, pionnier du traitement du signal en France³⁵⁰. Une partie de ces travaux a été synthétisée dans l'ouvrage écrit avec Robert Fortet, la *Théorie des fonctions aléatoires*³⁵¹, par ailleurs mentionné par Arsac dans son traité. L'avant-propos de cet ouvrage, qui mériterait un très long commentaire, illustre très bien ces rapports

³⁴⁸ Le colloque international d'Analyse Harmonique organisé à Nancy en juin 1947 est un temps de fort des rencontres entre ces mathématiciens, un temps d'échange et de construction pour Schwartz et sa théorie des distributions, un temps de structuration de la communauté mathématicienne sur le sujet. Parmi les participants André Blanc-Lapierre est probablement le principal relais vers les communautés des physiciens et des ingénieurs, voir ci-dessous. Voir (Paumier 2014; Paumier 2016).

³⁴⁹ (V. Bush et Wiener 1929). Le texte « Operational method for Circuit Analysis » (B. L. Robertson 1935) donne un aperçu de l'influence grandissante, parmi les ingénieurs, du calcul opérationnel d'Heaviside, en voie de théorisation avancée au cours des années 1930.

³⁵⁰ Voir (Segal 2003) qui contient en outre des extraits d'entretiens accordés par A. Blanc-Lapierre. Voir également l'archive orale : [URL : <http://www.histcnrs.fr/archives-orales/blanclapierre.html> consulté le 15 mai 2019].

³⁵¹ (Blanc-Lapierre, Fortet et Kampé de Fériet 1953).

de proximité entre instruments et mathématiques de l'analyse harmonique, tels qu'ils sont perçus en 1953 :

[...] il est bien certain que le spécialiste d'optique ou d'électricité a une notion physique très aigüe des divers problèmes de l'Analyse harmonique. Les techniques de spectroscopie fournissent une réalisation concrète de l'Analyse Harmonique. L'électricien sait par ailleurs très bien isoler au moyen de ses filtres telle ou telle bande de fréquence. On peut donc dire qu'au laboratoire on sait très bien résoudre expérimentalement ou pratiquement le problème de l'Analyse harmonique et isoler une portion de spectre, qu'il s'agisse du domaine de l'optique, du domaine de l'électricité ou de celui de l'acoustique. On peut donc penser qu'il est possible d'élaborer une théorie mathématique de l'Analyse Harmonique, en utilisant - après les avoir convenablement généralisées - les opérations mathématiques qui décrivent les transformations qui s'effectuent réellement dans les analyseurs de la physique (prismes, réseaux, circuits oscillants).³⁵²

Lorsque paraît l'ouvrage d'Arsac, l'algorithme de FFT n'a pas encore été publié. Il était important de se situer avant cet épisode pour saisir les enjeux de fond entre savoirs mathématiques structurants de l'analyse de Fourier et les possibles pratiques des instruments de Fourier, sans recours aux facilités du calcul numérique par ordinateur avec la FFT. Arsac choisit une voie qui le situe à la fois dans le monde de l'optique et l'interférométrie, et à la fois dans le calcul numérique. Ce n'est pas une généralité car les moyens de calcul analogique sont importants sur ces questions tout au long des années 1960 et dominent les possibilités du calcul numérique en pratique. Avant d'en venir aux mutations permises par la FFT, il s'agit de mettre en regard le fond et le contexte du traité avec les voies analogiques des instruments de Fourier qui se fédèrent dans le domaine de l'optique de Fourier.

H. L'émergence de l'optique de Fourier (1940-1960)

Les systèmes optiques très spécifiques imaginés pour le calcul de transformées de Fourier, dans les domaines de la cristallographie par diffraction de rayons X et en spectroscopie FTIR, témoignent de l'empirisme et du pragmatisme de physiciens qui rivalisent d'ingéniosité pour concevoir des instruments qui fonctionnent. Avant la seconde guerre mondiale, aucun de ces dispositifs n'est réellement systématisé et leur théorisation est très limitée. Pour l'essentiel tout se ramène à l'idée qu'une diffraction est un équivalent optique d'une transformée de Fourier : c'est ainsi qu'Arsac en 1961 peut le formuler, alors que Bragg en 1929 ou Patterson en 1927 l'avaient esquissé³⁵³.

Dans la pratique en tout cas, les physiciens instrumentent des artefacts optiques concrets tels que les lentilles, les réseaux, les interféromètres, pour produire des interférences et des diffractions, et réaliser des calculs analogiques complexes. Mais en dehors des résultats du duo Patterson-Wiener des années 1930, et de l'implication de mathématiciens autour de Bragg vers 1940, tout cet effort ne donne pas lieu, avant la guerre, à une théorisation générale de l'optique par et pour l'analyse de Fourier.

L'optique de Fourier qui se construit comme une systématisation de ces pratiques et théories optiques ne prend son véritable essor qu'après 1945. Elle recouvre aujourd'hui plusieurs champs de recherches de pointe comme l'optronique, le calcul optoélectronique, le

³⁵² (*Ibid.*, p. xi).

³⁵³ On peut toujours chercher des prédécesseurs et remonter aux travaux de Albert B. Porter (1906), Lord Rayleigh (1896) ou encore d'Ernst Abbe (1873) mais ces considérations ne sont pas directement transposables dans des termes contemporains du traité d'Arsac.

traitement optique de l'information et l'holographie. Le terme même d'optique de Fourier pointe un front de réflexion sur les rapports entre savoirs mathématiques et instrumentation, dans les cultures matérielles de l'optique. Cette histoire est à défricher dans son entièreté étant donnée l'historiographie qui, il faut bien le dire, se réduit à peu de chose : les travaux de Sean Johnston sur l'holographie font quasiment figure d'exception³⁵⁴. Les paragraphes qui suivent visent à indiquer des repères très partiels, mais structurant d'une recherche historique et épistémologique à conduire. Ils seront volontairement centrés sur les transformations des rapports entre les mathématiques de Fourier et ces formes d'optique. Le premier jalon correspond aux travaux de Pierre-Michel Duffieux, le second aux entrecroisements qui s'opèrent entre optique et théorie de l'information dans les années 1950, et le dernier pointe l'envol des ambitions de l'optique de Fourier cherchant à rivaliser avec le calcul électronique et les ordinateurs dans les années 1960.

1. Pierre-Michel Duffieux (1891–1976), pionnier de l'optique de Fourier

Le physicien français Pierre-Michel Duffieux est considéré comme un pionnier de la théorie de l'optique de Fourier, mais il ne sera reconnu que très tardivement. Son traité le plus célèbre est publié dans sa première version intégrale en 1946 : *L'Intégrale de Fourier et ses Applications à l'Optique*³⁵⁵. Mais ses idées sont contestées dans les cercles de l'optique en France dans les années 1940. La célébrité de Duffieux est tardive et liée à la publication du traité très influent de Max Born et Emil Wolf en 1959, *Principles of Optics*, dans lequel ils mentionnent ces travaux. Malgré cela le traité de Duffieux n'est pas traduit en anglais avant 1983, moment où il est devenu caduque au regard de 30 ans de développement de l'optique de Fourier. On recense à peine une notice nécrologique d'André Maréchal en 1976 dans *Physics Today*, un symposium en sa mémoire en 1997 et un laboratoire d'optique de l'université de Besançon qui porte son nom aujourd'hui³⁵⁶.

Les travaux de Duffieux puisent dans plusieurs traditions et influences. Son parcours autobiographique mentionne les sources principales de ses théories optiques³⁵⁷. En premier lieu, Duffieux s'inscrit dans une longue tradition de l'optique en France, remontant au 19^{ème} siècle, il a été l'élève de Charles Fabry (1867-1945), un de ses plus éminents représentants. Duffieux a puisé dans les travaux de Wiener, chose tout à fait remarquable à cette époque, jusqu'à emprunter le titre de son ouvrage de 1946 à celui de Wiener³⁵⁸. Duffieux propose une hybridation entre l'analyse harmonique héritée de Wiener et l'optique physique. C'est d'ailleurs ce qui pose un problème épistémologique avec la culture optique française des années 1940. Dans ce milieu, il est effectivement assez incongru d'aller chercher du côté des mathématiques de Fourier, les moyens d'une théorisation de l'optique physique³⁵⁹. Or son cheminement vers

³⁵⁴ (Johnston 2006). Il existe quelques biographies très succinctes d'acteurs de cette histoire, et une esquisse écrite sur « 60 ans de calcul optique » dans (Ambs 2010).

³⁵⁵ (Duffieux 1946). Il reprend et synthétise une bonne partie des travaux publiés depuis 1936, dont la série d'articles sur « L'analyse harmonique des images optiques » : (Duffieux 1940; Duffieux 1942).

³⁵⁶ Les rares éléments biographiques sont tirés du texte : (André Maréchal 1976). Duffieux a été professeur d'optique à l'Université de Besançon. Le département d'optique porte son nom : [URL : <https://www.femto-st.fr/fr/Departements-de-recherche/OPTIQUE> consulté le 10/04/2019].

³⁵⁷ Duffieux a intitulé son texte : « Comment j'ai pris contact avec la transformation de Fourier ». Il est reproduit en appendice des comptes-rendus du Symposium de 1997 : (Hawkes et Bonnet 1997, p. XI-XIII).

³⁵⁸ Pour rappel le traité de Wiener de 1933 s'intitule : *The Fourier integral and certain of its applications*.

³⁵⁹ Les propos de Charles Fabry rapportés par Duffieux nous semblent assez éloquent : « Qu'est-ce que c'est que ces équations ? où les avez-vous trouvées ? Je ne les comprends pas et aucun des opticiens que je connais n'en voudra. » dans (Hawkes et Bonnet 1997, p. XI).

l'analyse de Fourier, Duffieux le décrit comme structurant de ses recherches. Duffieux dépeint même le moment épiphanique des expansions en séries de Fourier dans sa théorisation des phénomènes d'aberration optique sur les franges d'interférence d'un interféromètre de Michelson, vers 1936 : les séries de Fourier qui s'introduisent dans les calculs d'aberration d'une part, et surtout l'utilisation d'un analyseur harmonique Mader-Ott pour les calculs optiques, dont la description est donnée dans un catalogue du constructeur Mader, d'autre part. Or l'artefact en question porte en lui les principes de l'analyse harmonique, ce dont Duffieux prend conscience et mettra à profit.

2. Les images en optique, entre transformée de Fourier et théorie de l'information

L'optique de Duffieux fait de la relation de transformée de Fourier entre un objet et son image une propriété optique structurante de la théorie, et non plus un phénomène curieux. Mais Duffieux travaille en solitaire, ni aidé par les mathématiciens, ni par les opticiens. C'est un physicien de la même génération que W.L. Bragg (1890-1971) mais ils s'ignorent réciproquement, à notre connaissance. La postérité de Duffieux passe par d'autres voies et se fait en pointillés. Dans la spectroscopie FTIR, nous avons mentionné que les Connes avaient connaissance des travaux de Duffieux, mais à un moment où son traité ne suffisait pas à donner des clés pour cheminer dans la spectroscopie FTIR. Arsac en fait un pilier de ses travaux en interférométrie pour la radioastronomie.

Dans le petit milieu de l'optique en France, un des rares à poser une pierre supplémentaire à l'édifice est André Maréchal (1916-2007), autre opticien de renom dans l'école française d'optique, enseignant à l'Ecole supérieure d'optique. En 1953 Maréchal propose une méthode de filtrage des fréquences spatiales³⁶⁰ : en lumière cohérente, avec une lentille qui réalise l'image d'un objet, on peut agir très directement dans le plan focal de la lentille sur le spectre des fréquences spatiales de l'objet, ce spectre étant la transformée de Fourier de l'objet. Ce sont les balbutiements du traitement de l'information en optique qui a pour première ambition la restauration des images dégradées, le filtrage et le débruitage des images dans les années 1950. Il s'étendra aux systèmes techniques très complexes de reconnaissance optique des formes et aux processeurs optiques des années 1970-80.

Dans les années 1950, c'est en fait tout le langage et les concepts du traitement de l'information qui s'introduisent dans l'optique³⁶¹, dans un basculement progressif de l'optique physique vers le traitement de l'information optique, parfois appelé « calcul optique »³⁶². C'est également l'approche choisie par ceux qui ont élaboré l'holographie après Dennis Gabor (1900-1979), en considérant les images comme de l'information et en utilisant les théories mathématiques de l'information de Shannon.

³⁶⁰ (A. Maréchal et Croce 1953).

³⁶¹ Les deux articles « Fourier treatment of optical processes » en 1952 et « Optics and communication theory » en 1953, dont l'auteur principal est Peter Elias, en sont emblématiques (Elias, Grey et Robinson 1952; Elias 1953). On peut rapprocher cette perspective des travaux menés en holographie, par Dennis Gabor, Emmett Leith ou encore Adolf Lohman, voir (Johnston 2006).

³⁶² Un des projets de « coherent-optical computer system » a été initié sous le nom de Project Michigan en 1953, financé par l'US Army Signal corps et l'US Air Force. Il est le début d'un ensemble de projets concernant directement ou indirectement le traitement des signaux radar par calcul optique (Preston 1972) et (Johnston 2006, p. 83-85).

Les technologies laser dans les années 1960 ouvrent de nouvelles perspectives pour l'optique grâce à cette lumière très cohérente. C'est ce qui génère une attente considérable au niveau de l'optique de Fourier, un grand enthousiasme et un projet à la mesure des années 1960 : concevoir un ordinateur optique complet, autonome, tirant parti des phénomènes optiques et leurs propriétés. Ce que Bragg avait souligné en 1944 en avançant l'idée de « Lightning calculation with light » en contexte cristallographique prend une toute autre ampleur³⁶³. La promesse de l'optique est désormais d'utiliser la lumière comme support d'information, pour un traitement des informations en parallèle et à très grande vitesse. L'information est mise sous forme d'image ou d'un signal optique à une dimension, pour bénéficier des propriétés des lentilles convergentes qui réalisent une transformée de Fourier quasiment instantanément. La généralisation de ce principe fait germer l'idée de concevoir une nouvelle classe d'ordinateurs génériques à haute performance.

Malgré tout, en 1960 déjà, des voies ont tempéré les enthousiasmes car si le caractère parallèle du calcul optique est généralisable, sa supériorité sur l'électronique ne s'exprime que dans les calculs de Fourier. Le processeur optique est donc très spécialisé alors que les technologies électroniques sont en passe d'emmener des calculateurs plutôt lents sur la voie d'un ordinateur générique et universel. On trouve les deux sons de cloche dans le grand symposium organisé en octobre 1962 à Washington (D.C.) sur le thème : « Optical Processing of Information ». Les thuriféraires du processeur optique générique s'opposent aux sceptiques³⁶⁴.

Néanmoins l'optique de Fourier, et les calculateurs optiques en particulier, se systématisent sur des artefacts matériels en nombre limité : lentilles, transducteurs, fibre optique et lasers constituent les artefacts d'une instrumentation pleine d'ambitions. Le cadre théorique de l'optique de Fourier est robuste et articulé autour de la transformée de Fourier optique, il profite de tous les savoirs mathématiques de l'analyse harmonique développée depuis 1930. Jusque dans les années 1960 l'optique de Fourier constitue un ensemble technologique et une instrumentation pour le calcul optique qui repose sur des principes de calcul analogique. Mais avec la montée en puissance et la concurrence de l'électronique, une double hybridation est en train de poindre : hybridation entre optique et électronique d'une part, hybridation entre systèmes analogiques et numériques, d'autre part.

Ce chantier de recherche historiographique est important, dans un champ où les matérialités optiques et les mathématiques de Fourier sont très intriquées, à un niveau sans précédent par rapport aux calculs optiques spécialisés pour la cristallographie par diffraction de rayons X. Il faut souligner que le contexte et les enjeux liés à cette optique de Fourier sont très différents. Il suffit de parcourir la littérature pour s'apercevoir que le domaine militaire tire

³⁶³ Voir page 150.

³⁶⁴ Les propos introductifs des organisateurs et éditeurs des comptes-rendus, D. K. Pollock, C. J. Koester et J. T. Tippett, sont très enthousiastes : « With the discovery and application of new optical effects and phenomena such as laser research and fiber optics, it became apparent that optics might contribute significantly to the development of a new class of high-speed general-purpose digital computers » (Pollock, Koester et Tippett (eds.) 1963, p. iii). Ils sont contrebalancés par les propos très mesurés de H.M. Teager : « We must reluctantly conclude the following with respect to general-purpose optical computers. First they are not here, nor are they in the immediate horizon. Second, if they do come, their form will probably not be that of one of the existing machines [...] We would not build a general-purpose machine based on optical technology - is there still a direct and evident place for optics in computers based on some other properties of light or optical devices or perhaps based upon new machines or on the problems we are having difficulty solving by machine? » (*Ibid.*, p. 18).

l'activité, tout particulièrement le militaire américain en pleine Guerre Froide. L'ONR (Office of Naval Research – US Navy) est en première ligne dans les financements et l'organisation de la communauté. Le colloque de 1962, qui rassemble près de 425 chercheurs, est financé en grande partie par l'ONR. L'Office est un investisseur massif à toutes les échelles de la physique après la guerre³⁶⁵. Les recherches orientées vers la reconnaissance optique de forme, le traitement de l'information à très haute performance ont une portée stratégique qui n'a pas échappé aux militaires américains.

Qu'en est-il du côté de l'optique en France ? Même s'il a pu être contesté dans les années 1940, l'optique du Duffieux a manifestement percolé parmi les physiciens : les époux Connes au Laboratoire Aimé Cotton, Jacques Arsac à l'Observatoire de Meudon, André Maréchal à l'Ecole supérieure d'optique, sans compter les élèves de Duffieux lui-même à l'université de Besançon. Peut-on se limiter à ce périmètre ? Le texte d'Henri Mermoz publié en 1967, mais daté de 1965, « La transformée de Fourier en optique et ses possibles applications »³⁶⁶, intégrant tous les travaux précités, semble nous indiquer que l'écosystème à considérer est bien plus vaste. Ingénieur général des Télécommunications, et directeur pendant 15 ans du Laboratoire de détection sous-marine du Brusc, Mermoz est plus connu pour ses travaux sur les sonars et il est un des meilleurs spécialistes français du traitement du signal³⁶⁷, fondateur avec André Blanc-Lapierre du GRETSI (Groupe d'Etude du Traitement du Signal) puis du CEPHAG (Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires de Grenoble) en 1963. L'histoire de l'optique de Fourier en France est, elle aussi, à projeter dans celle des rapports scientifiques entre civil et militaire, dans la période gaullienne tout particulièrement, et à inscrire dans une perspective plus large qui serait celle de l'histoire du traitement du signal en France, matière à une recherche doctorale très ambitieuse.

I. La « Fast Fourier Transform » : origines et dissémination

Il nous reste à placer un dernier jalon, le plus important au regard du passage de l'instrumentation de Fourier des technologies analogiques vers toujours plus d'électronique numérique. Il n'est pas un acteur impliqué dans la conception des instruments de Fourier contemporains qui n'a souligné à quel point l'algorithme de FFT a bouleversé l'usage dans son domaine. L'algorithme a été classé dans les dix plus importants de l'informatique par l'association savante SIAM³⁶⁸ en 2000 et il est un des plus utilisés aujourd'hui dans des fonctions très diverses : compression numérique de données (formats JPEG), multiplication de grands nombres, multiplication de matrices, résolution d'équations aux dérivées partielles... qui s'ajoutent à toutes les fonctions instrumentales en spectroscopie, cristallographie, radioastronomie que nous avons évoquées.

L'année 1965 marque la diffusion très rapide de l'algorithme avec la publication de l'article : « An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series »³⁶⁹ signé par James Cooley et John Tukey. C'est un paramètre indéniable du « retour » de Fourier, en termes quantitatifs, étant donné la multiplication des usages d'opérations numériques à base de FFT en

³⁶⁵ Sur l'histoire de l'ONR et de la communauté physicienne aux États-Unis : (Sapolsky 1990; Kevles 1995).

³⁶⁶ (Mermoz 1967).

³⁶⁷ (Jourdain 1993).

³⁶⁸ Society for industrial and applied mathematics. La FFT figure dans ce *Top 10* aux côtés de la méthode Monte-Carlo, Quicksort, l'algorithme QR, décompositions de matrices, etc. La FFT est qualifié de « Easily the most far-reaching algorithm in applied mathematics » (Cipra 2000).

³⁶⁹ (Cooley et Tukey 1965).

quelques années. Mais son importance, eu égard à nos instruments, tient aux implémentations dans des systèmes électroniques, matériels, avec toutes les contraintes de réalisation qu'elles imposent. Il serait impensable d'analyser la diffusion de la FFT hors de ces incarnations matérielles, même si elles sont fondées dans beaucoup de cas sur la programmation d'un système informatique, qu'il soit miniaturisé ou non. En se concentrant sur l'algorithme, abstraction faite de son contexte de création, nombreux sont ceux qui ont cherché des antécédents et ont fait des travaux de Carl F. Gauss au début du 19^{ème} siècle le socle³⁷⁰ d'une FFT que Cooley et Tukey n'auraient fait que redécouvrir. Ecrire une socio-histoire de la FFT en contexte n'a pas été fait de manière exhaustive alors qu'elle permettrait de donner un sens plus juste à cet instrument mathématique. Le processus de création et de diffusion de la FFT a, en outre, la chance d'être très documenté, entre les publications scientifiques, les ouvrages et les actes de colloques, les multiples interviews des protagonistes de cette histoire, constituées en archives orales et accessibles facilement sur le Web.

Rappelons au préalable, et avec insistance, qu'on calcule des transformées de Fourier bien avant l'invention de la FFT et que le moyen le plus rapide au tournant de 1960 sont les systèmes analogiques optiques. Des méthodes de Carl Runge datant de 1903 jusqu'aux méthodes d'Arsac, en passant par celles de Georges Campbell aux Bell Labs, les méthodes numériques ne manquent pas non plus, mais sont bien plus complexes à mettre en œuvre. À cette liste on peut ajouter celle du physicien Gordon C. Danielson (1912-1983) et du mathématicien-physicien Cornelius Lanczos (1893-1974) publiée³⁷¹ en 1942 pour l'analyse des liquides par diffraction de rayons X. Ils inventent un procédé pour les calculs de coefficients de Fourier destiné à gagner en précision : par un procédé de factorisation, ils montrent qu'on peut multiplier par deux le nombre de points en entrée, en doublant seulement la quantité de calculs, alors que le procédé de calcul habituel devrait multiplier par 4 les calculs. Ce procédé n'est pas sans rappeler celui de la FFT, 20 ans plus tard, mais il est imaginé dans le cadre du calcul aidé par les machines mécaniques ou mécanographiques, donc loin du contexte du calcul électronique des années 1960.

Si une demande de calcul numérique plus rapide se fait pressante dans les années 1960 elle s'inscrit dans un contexte très particulier bordé par deux perspectives essentielles : celle de la recherche sur les algorithmes pour répondre à la fois à la diffusion des ordinateurs et compenser leurs « faiblesses » en termes de puissance de calcul et de mémoire ; et celle de la course technologique propre à l'épisode de Guerre Froide, qui lui est reliée³⁷². Pour alimenter l'écriture de cette histoire, nous donnerons un aperçu du contexte de création de la FFT, indiquant ses origines et les modalités d'invention, avant de préciser quelques-unes des voies de la dissémination de la FFT dans tout le système scientifique et technique.

³⁷⁰ Par exemple dans la description donnée par la SIAM dans son *Top 10* (Cipra 2000), reprise certainement de la propre histoire écrite par J. Cooley en 1987 : (Cooley 1987a).

³⁷¹ « Some improvements in practical Fourier analysis and their application to x-ray scattering from liquids » (Danielson et Lanczos 1942).

³⁷² Paul Edwards a détaillé cette parenté entre les discours politiques de repliement des États-Unis sur eux-mêmes, dans cette course technologique, et le monde centralisé promis par les développements informatiques dans les années 1950 et 1960 (Edwards 1996).

1. Contexte de création de l'algorithme de FFT

Lorsqu'ils publient leur article en 1965, James W. Cooley (1926-2016) est chercheur au Watson Research Center d'IBM et John W. Tukey (1915-2000) est un statisticien, professeur à l'Université de Princeton et collaborateur aux Bell Labs. Au regard de leur activité antérieure et postérieure, c'est leur seule collaboration scientifique, ce qui interroge sur les circonstances qui ont présidé à celle-ci. Leur rencontre s'est faite par l'intermédiaire du physicien Richard Garwin³⁷³, qui est plus connu pour avoir conçu la première bombe H avec Edward Teller à Los Alamos en 1952. Garwin est embauché par IBM en 1953 au Watson Research Center à Yorktown Heights (New York) où il fera le reste de sa carrière. Il est par ailleurs membre du President Scientific Advisory Committee dans l'administration de John F. Kennedy entre 1961 et 1963. John Tukey en est également membre. Au menu de ce comité, dans l'actualité de la Guerre Froide, se trouvent les termes du traité d'interdiction des essais nucléaires en négociation avec l'URSS. Le comité aborde la question suivante : sachant que l'URSS ne se soumettrait jamais à des inspections sur son territoire, pour satisfaire aux accords de limitation de la prolifération, comment peut-on détecter à distance des tests nucléaires en URSS ? La surveillance de ces explosions par l'activité sismologique est une piste : une explosion nucléaire en sous-sol génère un petit séisme ressenti sur de grandes distances, même s'il est affaibli. Un sismographe peut enregistrer un tel signal, qui permettrait une détection indirecte d'une telle explosion. Si l'idée est séduisante pour Garwin, elle nécessite une analyse spectrale redoutable et un volume de calcul de transformée de Fourier trop important. La mise en œuvre est extrêmement complexe du fait que le signal sera noyé dans beaucoup de bruit sismique, sans compter les difficultés de remonter de l'enregistrement sismographique à la localisation de la source et d'estimer sa puissance.

De tels travaux en sismologie sont réalisés en parallèle des négociations internationales. John Tukey travaille avec deux autres mathématiciens, Bruce Bogert et le statisticien Micheal J.R. Healy³⁷⁴, pour déterminer des critères de discrimination entre une explosion et un tremblement de terre dans les données sismiques. Une de leurs idées originales permet l'estimation de la profondeur de la source du signal sismique : dans certaines circonstances le séismographe enregistre la superposition du signal avec un écho de ce signal, dont le retard est proportionnel à la profondeur de la source. Le repérage dans les traces sismographiques de ce type d'évènement permettrait de discerner une explosion et d'évaluer sa profondeur. De ces travaux émergeront par ailleurs de nouveaux concepts, une nouvelle méthodologie en analyse des données : la cepstrum analysis³⁷⁵.

John Tukey intervient dans cette histoire à double titre, pour les travaux de sismologie, mais surtout comme un des plus brillants statisticiens du 20^{ème} siècle, spécialiste de l'analyse spectrale et de l'analyse statistique des données. Il est le véritable chef d'orchestre de ces

³⁷³ J. Cooley a décrit ces rencontres croisées et le rôle de Garwin dans (Cooley 1987a).

³⁷⁴ Micheal Healy (1923-2016) est un statisticien de grand renom, spécialiste en statistique médicale (Matthews et Healy 1998). Nous n'avons que très peu d'informations à ce jour sur Bogert, mathématicien formé au MIT (PhD en 1946), certainement proche de John Tukey.

³⁷⁵ Leur publication rassemble en fait un lot de nouveaux concepts pour l'analyse spectrale : « The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking ». Elle a été présentée en octobre 1962 pour la première fois, au colloque « Time series analysis » à l'Université Brown. (Bogert, Healy et Tukey 1963).

recherches dans leur versant mathématique. Son parcours biographique³⁷⁶ jette un éclairage très important sur l'histoire qui mène à la FFT. Sa trajectoire est en effet inscrite dans une sorte de continuation des travaux de Norbert Wiener, au carrefour de l'analyse harmonique et de l'analyse des séries temporelles. Tukey qui échange avec Wiener depuis 1942 au moins, voulait ouvrir les travaux de Wiener aux statisticiens. Tukey a débuté ses recherches sur les séries temporelles dans le cadre des analyses des signaux radar, avec Richard Hamming et H.T. Budenbom aux Bell Labs, à la fin des années 1940. L'analyse spectrale repose alors sur les travaux de Wiener et la relation de transformée de Fourier entre la fonction d'autocorrélation des données radar et la densité spectrale de puissance du signal (théorème de Wiener-Khintchine). Mais Tukey introduit de nouvelles méthodes d'analyse spectrale, en particulier pour calculer des spectres de puissance à partir de données empiriques. Sa présentation en 1949 au Symposium « Autocorrelation Analysis Applied to Physical Problems »³⁷⁷ consolide la réputation de Tukey comme mathématicien et statisticien prééminent, et inventeur de l'analyse sur les séries temporelles courtes.

Ses travaux ultérieurs avec Ralph B. Blackman (1904-1990) sont devenus fondamentaux dans l'analyse spectrale pratique. Le traité *The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering*³⁷⁸ est un ouvrage de référence publié en 1959, fruit de la rencontre du statisticien Tukey avec Blackman, ingénieur des télécommunications aux Bell Labs, devenu mathématicien. L'orientation vers l'analyse de spectre de puissance, plutôt que sur la fonction d'autocorrélation est significative ici car les ingénieurs des télécommunications travaillent avec les données spectrales³⁷⁹. Toutes ces méthodes sont dites « indirectes » et cherchent à minimiser le recours au calcul de la transformée de Fourier des données empiriques, trop long, trop coûteux.

Mais entre les problématiques spécifiques de la sismologie, du traitement du signal en général, et l'opportunité du calcul par ordinateurs, les moyens de calculer directement les transformées de Fourier, rapidement, constituent l'horizon idéal de tous ces domaines de recherches, aussi bien théoriques que pratiques. Comme nous l'avons analysé dans l'ouvrage d'Arsac, la problématique est double : d'une part, et puisque tout est cadré ici par le calcul numérique sur ordinateur, il s'agit de procéder en fait à des calculs de transformées de Fourier discrètes (TFD ou Discrete Fourier Transform en anglais) ; ce qu'il faut distinguer, d'autre part, de l'analyse numérique visant à déterminer l'adéquation de la transformée de Fourier discrète calculée comme approximation de la transformée de Fourier continue. Les algorithmes de la TFD, en discrétisant le calcul intégral, reposent *in fine* sur des séries de Fourier.

L'algorithme de la FFT est un perfectionnement de la méthode de calcul de la TFD uniquement. L'idée de Tukey, suivi par Garwin, est d'introduire un procédé de factorisation et d'itération à la place du calcul direct de la TFD. Pour $N=A.B$ la série de Fourier de N termes intervenant dans le calcul de la TFD peut s'exprimer comme une série de A termes de sous-séries de B termes. On peut ainsi réduire le nombre d'opérations pour le calcul des coefficients de $N \times N$ calculs à $N.(A+B)$ calculs. En itérant le principe, et en choisissant des nombres N sous

³⁷⁶ La biographie scientifique la plus précise a été écrite par son ancien collègue et statisticien à Princeton, David Brillinger (également l'éditeur des *Collected Works* de Tukey) : (Brillinger 2002).

³⁷⁷ Le Symposium se tient en juin 1949 (Woods Hole, Massachusetts) financé par l'Office of Naval Research (US Navy). Le texte de Tukey est republié dans (Tukey 1984).

³⁷⁸ (Blackman et Tukey 1959).

³⁷⁹ La méthode d'estimation spectrale de Blackman-Tukey repose sur la notion de corrélogramme, méthode implémentée dans différents instruments d'analyse spectrale.

forme de puissances de 2, le nombre total d'opérations peut se ramener de N^2 opérations à $N \cdot \log(N)$ opérations. Danielson et Lanczos en 1942 avaient pointé un gain possible sur le nombre d'opérations dans le cas d'une factorisation des calculs, spécifiquement sur le cas de doublement du nombre de termes. Mais d'une part Cooley et Tukey n'en avaient pas connaissance, d'autre part, leur méthode est plus générale et surtout guidée par de toutes autres problématiques. Fin 1963, Garwin partage ces idées avec James Cooley, fraîchement arrivé à l'IBM Watson Research Center : Cooley développera les premiers algorithmes et programmes de FFT en trois dimensions. L'économie de calcul est spectaculaire : un calcul de FFT sur 1024 points coûte 100 fois moins de temps qu'un calcul classique ; sur un million de points ce ratio est porté à plus de 100 000.

2. La diffusion des algorithmes de FFT

L'analyse spectrale et le traitement du signal, dans leurs versants numériques, sont évidemment en première ligne de l'utilisation de cette nouvelle procédure, pour les questions tous azimuts de la sismologie, l'acoustique sous-marine, l'analyse des vibrations, les télécommunications, etc. La spectroscopie FTIR, par l'intermédiaire de Janine Connes, est rapidement investie dans le développement des programmes de FFT : c'est un algorithme très ingénieux, mais sa mise en œuvre, pour devenir l'instrument de calcul pratique, n'a rien de simple³⁸⁰.

Conjointement, la place et le rôle de la transformée de Fourier évoluent dans tous les champs scientifiques et techniques où l'analyse de Fourier avait une place. La transformée de Fourier était connue pour toutes ses propriétés mathématiques, physiques et statistiques. Avec la FFT elle trouve des propriétés computationnelles nouvelles. L'instrument théorique devient instrument de mathématique et de calcul très pratique. Nous l'avons constaté, et les ouvrages d'Arsac et de Bracewell le confirment, chaque communauté gère « son » problème de Fourier de manière relativement isolée des autres, chacun dans sa tradition instrumentale. Des instruments de Fourier pouvaient ponctuellement circuler d'un champ à l'autre, mais avec la FFT se dessine une grande convergence qui repose sur la transversalité, acquise antérieurement, de l'analyse de Fourier dans ces différents domaines.

Si la FFT a des allures de panacée, sa mise en œuvre n'est ni évidente, ni uniforme d'une problématique à l'autre³⁸¹. La spectroscopie FTIR fait figure de domaine pionnier, dont le terrain est très préparé et très propice à l'introduction de la FFT. L'analyse spectrale, qui reposait sur les méthodes « indirectes », va se transformer très rapidement, avec de nouvelles méthodes « directes » prenant d'emblée le parti de calculer des transformées de Fourier, et de tout traiter dans le domaine fréquentiel. En géophysique et sismologie, dans la prospection pétrolière par l'analyse sismique, la FFT a eu un effet immédiat, parce que les procédés de déconvolution statistique étaient déjà orientés par le calcul numérique massif³⁸². La cristallographie par rayons X, pourtant fortement dépendante de l'analyse de Fourier, adoptera la FFT avec un décalage de quelques années, comme nous l'avons indiqué.

³⁸⁰ Voir les détails page 91 et suivantes.

³⁸¹ James Cooley a témoigné des cheminements sinueux des multiples algorithmes de FFT dans son texte « How the FFT gained acceptance » (Cooley 1987b).

³⁸² L'interview d'Enders Robinson, un des acteurs principaux du développement des méthodes de déconvolution en géophysique dans les années 1950, au MIT, apporte un témoignage très important de ce point de vue dans « Oral history conducted by Andrew Goldstein » en 1997, IEEE History Center [URL : https://ethw.org/Oral-History:Enders_Robinson consulté le 13/04/2019].

En quelques années enfin, le traitement du signal va connaître un tournant global vers le numérique dont les déterminants sont multiples, à la fois matériels, logiciels et mathématiques. Dans ses aspects matériels, le traitement analogique est toujours performant, mais manque de souplesse et d'adaptabilité. Pour réaliser un traitement numérique, en revanche, il faut d'abord des systèmes de convertisseurs analogique-digital, puis des systèmes électroniques suffisamment performants pour gérer le flux numérique, en termes de calcul et de mémoire. La FFT représente un gain algorithmique théorique, à convertir en pratique en termes logiciels pour glisser vers le « Digital Signal Processing », sur des bases matérielles adéquates.

3. Encapsuler la FFT sur des puces électroniques

Comment cela se traduit en termes de fabrication d'instruments et de commercialisation ? Très vaste sujet, sur lequel nous n'avons que de maigres réponses à apporter, dans l'attente d'une exploration approfondie. L'algorithme de FFT est porté dans tous les langages informatiques orientés sur le calcul scientifique, prioritairement Fortran, qui est universellement adopté dans le milieu scientifique dans les années 1960-70. La FFT devient une routine au sens commun et au sens informatique du terme. Dès lors qu'un système informatique est accessible, ce qui est somme toute la principale barrière jusque dans les années 1970, un calcul de FFT coûte très peu cher.

Parallèlement, des analyseurs spectraux sont assemblés pour intégrer cette FFT. Entre 1969 et 1975, quelques constructeurs d'instruments se partagent ce marché en développement³⁸³. Parmi les tous premiers, la petite entreprise américaine Time/Data Corporation présente son « T/D 100 FFT Processor » qui calcule des FFT sur 1024 points d'entrée en 1 seconde. Par choix de conception, un des successeurs de cet analyseur, le T/D 1923 repose sur le mini-ordinateur PDP-11 de DEC : il est livré en 1972. Mais l'analyseur numérique qui marque vraiment le marché est celui du constructeur Hewlett-Packard : le HP5451 et ses multiples variantes entre 1972 et 1975³⁸⁴. Il est conçu autour d'un mini-ordinateur produit en interne, le HP 2100, correspondant à la stratégie du groupe de se diversifier dans les systèmes informatiques rivaux des machines DEC. La conception de l'analyseur est modulaire, avec de multiples périphériques pour le contrôle de l'appareil, l'affichage et le convertisseur analogique-numérique. Le système de FFT est un module à ajouter à l'analyseur. Il en existe deux versions, le « 5470A Fast Fourier Processor » et le « 5471A FFT Arithmetic Unit » : le premier est un périphérique externe dédié à la FFT possédant sa propre mémoire, le second s'intègre directement dans le mini-ordinateur pour accélérer les calculs d'un facteur 6, mais utilise la mémoire de l'ordinateur. Chez HP comme chez les autres fabricants, les options de conception matérielle sont multiples et répondent à des usages diversifiés : vibrations mécaniques, acoustique sous-marine, sonar, ingénierie civile, dynamique des structures, construction automobile, etc. Quelques autres constructeurs d'instruments entreront dans les années 1970 : Nicolet 440A Mini-Ubiquitous, Spectral Dynamics SD360, plus tard le Digital Frequency Analyser type 2131 du fabricant spécialisé dans le son et les vibrations Brüel&Kjaer. Tous ces systèmes sont conçus en partie sur la base de matériels très spécifiquement créés pour calculer des FFT, car ils sont plus rapides, et recourent à l'utilisation de mini-ordinateurs génériques qui permettent plus de souplesse, de

³⁸³ Un court article dans *Sound and Vibration* indique le démarrage de ces systèmes commerciaux, avant l'envolée des années 1980 : (Welaratna 1997).

³⁸⁴ Il existe une documentation technique très complète sur ces instruments. Voir la synthèse écrite dans le *Hewlett-Packard Journal* en juin 1972 (Cline et Marschke 1972).

contrôle, de modules d'entrée-sortie. Ce sont des constantes retrouvées dans l'instrumentation scientifique en pleine transformation, dans les années 1970.

Dans un dernier volet concernant la matérialisation et la dissémination de la FFT dans l'ensemble du système technique, nous évoquerons le processus d'intégration de l'algorithme dans ce qui constitue les systèmes Wi-fi au quotidien. Ce processus est une sorte de concentré d'une histoire de l'instrumentation de Fourier depuis les années 1970, qui a permis de déposer le brevet US4587069 « Wireless LAN » en 1992³⁸⁵. Le brevet est le résultat très direct d'un projet australien piloté au CIRSO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) en 1991, par l'ingénieur et radioastronome australien John O'Sullivan : le projet « Program for Local Area Network Systems ». C'est un ambitieux projet de création d'un système de communication sans fil entre ordinateurs : les réseaux de données par radio existent déjà, mais leurs performances sont faibles, limitées par les distorsions et les échos de signaux. Le transfert fiable de données est difficile dans des réseaux sans fil dans un bâtiment, avec des obstacles qui produisent des réflexions multiples et des interférences. En s'appuyant sur les techniques de Fourier, il est possible de réaliser une modulation et un codage de signaux numériques efficace, en découpant les signaux en petites bandes, et en étirant l'information sur des bandes bien plus larges que celles générées par les réflexions contre les structures d'un bâtiment. Des canaux individuels peuvent se constituer et être recomposés grâce à un traitement par FFT. Tout repose sur l'utilisation de systèmes informatiques de calcul de FFT en temps réel pour les communications sans fil.

Cet aboutissement repose sur une somme d'expertise considérable, une technologie éprouvée, un contexte et une politique de recherche scientifique et technique construite dans les années 1980 en Australie. John O'Sullivan est au centre de ce long processus pour plusieurs raisons. Il dirige le groupe « Signal and Imaging Technology » au sein du CSIRO de 1983 à 1995. Il sera le promoteur du traitement du signal numérique, à base de transformée de Fourier, dans un champ d'application très large, allant de l'électro-acoustique aux télécommunications. Par la voie de Robert Frater, directeur de la Radio-Physique au CSIRO, le groupe s'inscrit dans une politique de développement de technologies commercialisables. O'Sullivan est dans le premier projet de puce électronique A41102, dédiée au calcul de transformée de Fourier. Elle est produite avec une petite firme spécialisée dans la microélectronique en Australie, Austek Microsystems, dans la lignée des programmes visant la VLSI et en écho aux programmes technologiques contemporains qu'on peut trouver aux États-Unis ou au Japon³⁸⁶. Le contexte du projet LAN est assez clair, et les préliminaires technologiques sont acquis en 1991 : les

³⁸⁵ US5487069A – « Wireless LAN » - déposé le 27 novembre 1992, accepté le 23 novembre 1993. Les cinq inventeurs sont John D. O'Sullivan, Graham R. Daniels, Terence M. P. Percival, Diethelm I. Ostry, John F. Deane. Ils ont été honorés du prix « European Inventor Award » en 2012. Terence Percival rentre dans le projet pour modéliser et réaliser le prototype de matériel pour la communication « Wi-fi » (pour « Wireless » et en clin d'œil à « Hi-Fi » pour « High Fidelity »). David Skellern développe au sein de l'Université Macquarie un projet de Wireless-LAN (local area network), un réseau sans fil local informatique. De ces projets émaneront, en 1997, la société Radiata Communications pour commercialiser les prototypes, pendant qu'une normalisation se met en place au sein de l'IEEE (aboutissant à la première norme IEEE 802.11). Voir [URL : <https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2012/osullivan.html> consulté le 13/04/2019].

³⁸⁶ VLSI = Very Large Scale Integration. Le VLSI désigne les programmes industriels, entamés dans les années 1970, visant à réaliser des puces électroniques intégrant plus de 100 000 composants. Austek Microsystems a été créée en 1984 pour commercialiser ces technologies développées au CIRSO. Pour les programmes aux États-Unis, au Japon et la dynamique politico-industrielle globale de ce secteur de la microélectronique, voir (P. R. Morris 1990; Chandler 2001; Harsha et al. 2004).

matérialités électroniques, qui sont en phase de miniaturisation accélérée, sont capables d'encapsuler un traitement de Fourier rendu invisible, efficace et temps réel.

La conception du système Wi-fi n'est pas que cela. Elle repose sur le fait que la reconstitution d'un signal après de multiples réflexions et interférences est, par analogie, un problème courant en radioastronomie, ce que John O'Sullivan sait depuis ses débuts dans le domaine vers 1970. Le projet astrophysique sur lequel il a fait ses armes est le suivant : après que l'astrophysicien Stephen Hawking a suggéré vers 1974 que les fluctuations quantiques dans un trou noir peuvent générer des radiations et qu'un petit trou noir puisse exploser, la radioastronomie cherche à détecter ce type d'explosion, dont la signature est une bouffée d'ondes électromagnétiques. O'Sullivan est pris dans le défi instrumental pour réaliser ces détecteurs. Dans les éloges qui sont faites à O'Sullivan il est rarement fait mention qu'il est d'abord formé comme ingénieur électricien (« Electrical Engineering ») attaché aux travaux sur les récepteurs des radiotélescopes durant son PhD³⁸⁷. Ces problématiques techniques et scientifiques sont à un carrefour de la radioastronomie qui s'est développée considérablement depuis la seconde guerre mondiale grâce aux progrès des radars, de l'ingénierie du traitement du signal et de l'électronique.

Après sa thèse en Australie, O'Sullivan rejoint le Radio Observatory à Dwingeloo, aux Pays-Bas, en 1974, cadre de ces développements instrumentaux. La première détection d'événement radioastronomique en rapport avec les trous noirs est réalisée à Dwingeloo³⁸⁸. Mais c'est une première frustrante car malgré les développements techniques, très laborieux, les enregistrements obtenus sont très bruités. Une partie des distorsions est due à l'atmosphère terrestre, ce qui est un problème récurrent et très ancien de l'astronomie. Mais les techniques contemporaines de l'optique de Fourier, transposées en radioastronomie, permettent de résoudre une partie du problème. Les radioastronomes introduisent un traitement par analyse de Fourier dans les détecteurs pour gagner en clarté et précision sur les images radioastronomiques. Ces résultats sont publiés en 1977, dans la livraison n° 67 du *Journal of the Optical Society of America – Letters* : « Image sharpness, Fourier optics, and redundant-spacing interferometry »³⁸⁹. Ce type de traitement du signal constitue la lointaine mais fondamentale base technique du problème rencontré dans le programme LAN. Le système Wi-fi est bien plus qu'une intégration logicielle de l'algorithme de FFT, il encapsule une analyse de Fourier à différents niveaux, expérimentée dans le domaine de pointe de la radioastronomie depuis les années 1970. La technologie est tout autant une construction politico-industrielle australienne, dont les mécanismes ont à peine été esquissés ici. L'organisation, les modes de financement, l'incorporation des demandes socio-économiques dans les projets, tous les aspects de cette construction mériteraient d'être analysés et comparés aux efforts de politiques de R&D impulsés à la même époque aux Etats-Unis, bien sûr, mais également en France avec les outils élaborés depuis la période gaullienne : entre les « Actions concertées » et les différents « Plans » qui ont fleuri depuis le Plan Calcul (1966-1975) jusqu'aux plans pour la filière électronique comme le Plan Composants (un premier annoncé en 1967, relancé en 1978)³⁹⁰.

³⁸⁷ Il fait sa thèse sur le sujet, auprès de Wilbur Norman Christiansen, physicien australien pionnier de la radiophysique. Dans les années 1970 c'est le projet de Fleurs Synthesis Telescope qui les occupent, reposant sur le principe de la combinaison de signaux venant d'un réseau d'antennes de radiotélescope.

³⁸⁸ (O'Sullivan, Ekers et Shaver 1978).

³⁸⁹ C'est une courte synthèse de trois auteurs J. O'Sullivan, J.P. Hamaker et J.E. Noordam : (Hamaker, O'Sullivan et Noordam 1977).

³⁹⁰ Voir notamment (Pierre-E. Mounier-Kuhn 1994; Le Bolloc'h-Puges 1991).

Ces éléments dessinent autant de facettes problématiques d'un projet de recherche doctoral important en histoire des technosciences très contemporaines.

J. Retour sur le « retour » de Fourier

Depuis le traité de Fourier de 1822 jusqu'à la définition des algorithmes de FFT, nous avons échafaudé une ossature de ce qui pourrait être une histoire générale des instruments de Fourier. Ce n'est qu'un squelette émaillé de nombreuses problématiques de recherche dont l'exploration apportera la chair de cette longue histoire. Il reste donc à analyser les méandres des évolutions de l'analyse de Fourier, de l'analyse spectrale, examiner les savoirs encapsulés dans les instruments, les artefacts qui sont au cœur des instruments, les modes de conception des instruments mathématiques mécaniques, électriques, optiques et électroniques.

Au fil de l'élaboration de cette trame historique nous avons croisé les trajectoires de beaucoup d'acteurs d'horizons très divers. Il nous semble important de souligner à nouveau le trait commun qui les fait entrer dans cette histoire : ce sont des praticiens des mathématiques qui élaborent des savoirs mathématiques et des instruments mathématiques. Parmi eux certains sont des mathématiciens de premier plan mais beaucoup n'endossent pas l'étiquette de « mathématicien ». Pour la plupart d'entre eux, ils travaillent dans des lieux qui permettent ces hybridations de pratiques mathématiques et instrumentales. Pêle-mêle on reconnaîtra Janine Connes, Norbert Wiener, Pierre-Michel Duffieux, John Tukey, Arthur Patterson, Vladimir Vand, Jacques Arsac, John O'Sullivan... et le premier d'entre eux, Joseph Fourier lui-même. Cette courte liste ne fait que cacher une foule d'autres praticiens, acteurs de cette instrumentalisation générale (au sens de Rabardel) des mathématiques de Fourier.

Nos analyses, même si elles sont encore partielles, nous permettent de revenir à l'idée de « retour » de Fourier, en étant mieux armés. Jusque dans nos derniers exemples, il est clair que la quantité de savoirs mathématiques de Fourier encapsulés dans les instruments et les outils du quotidien est impressionnante. Au milieu du 20^{ème} siècle, l'intérêt pour l'analyse harmonique est revivifié par des questions mathématiques aussi bien qu'instrumentales, éclairant le constat que nous faisons quant à un pic d'intérêt entre 1940 et 1960. De 1940 aux années 1970, la montée continue de l'intérêt pour la transformée de Fourier accompagne les évolutions sur le sens et le rôle de cet instrument mathématique en théorie physique, en optique, en mathématiques. La FFT en accentue l'intérêt computationnel après 1965, sa dissémination s'accélère et accompagne une convergence des manières de concevoir des instruments. Des champs de recherche qui ne s'étaient que ponctuellement rencontrés jusque-là, utilisant des savoirs mathématiques proches mais dans des perspectives instrumentales différentes, trouvent un intérêt commun pour la FFT, devenue une sorte de locomotive instrumentale. Ce qui pose la question du développement des algorithmes d'une part, et des artefacts électroniques, c'est-à-dire de la matérialité qui a permis d'encapsuler cette FFT, d'autre part. La suite de nos analyses sur les transformations électroniques des instruments dans les années 1970 est éclairante sur ce point.

Terminons avec le tout dernier constat établi au sujet de la perte de vitesse de la FFT sur la dernière décennie du 20^{ème} siècle, mise en regard de l'intérêt croissant, et tout aussi massif que dans les grandes heures de la FFT, pour les « ondelettes ». Les mathématiciens s'accordent à penser que l'analyse par ondelettes est une extension³⁹¹ de l'analyse de Fourier, dans laquelle

³⁹¹ De Jean-Pierre Kahane à Yves Meyer, tous les acteurs mentionnés ici s'accordent sur cette filiation.

les fonctions ne sont plus des fonctions trigonométriques mais des ondes de courte durée, qui oscillent en s'amortissant contrairement aux sinusoides qui persistent indéfiniment. L'histoire de la conception de la transformée en ondelettes fait écho à de nombreux aspects de l'histoire des instruments de Fourier. Mais elle est à écrire en grande partie puisque les éléments de cette histoire aujourd'hui sont très limités à la mémoire récente de ses acteurs³⁹², laissant par ailleurs de côté certains pans dans l'ombre, en particulier, il nous semble, des ingénieurs impliqués à l'origine de ces ondelettes.

Les ondelettes en question ont d'abord été introduites par Jean Morlet (1931-2007) dans les années 1970. Morlet est alors ingénieur chez Elf Aquitaine dans la prospection pétrolière et promoteur d'une technique vibro-sismique d'analyse des couches sédimentaires³⁹³. Il a présenté ses premiers travaux entre 1975 et 1980 dans les colloques de la Society for Exploration-Geophysicists, publiés seulement dans la revue *Geophysics* en 1982³⁹⁴ : on notera au passage que trois autres ingénieurs et géophysiciens d'Elf Aquitaine sont co-auteurs de tous ces travaux, Georges Arens, Dominique Giard et E. Fourgeau, mais ils ne sont quasiment jamais mentionnés dans les rapides historiques sur les ondelettes. La méthode de Morlet consiste à envoyer des ondes de vibrations dans le sol, à en mesurer les échos dans des capteurs à distance de la source des vibrations et analyser les résultats pour déterminer les caractéristiques des couches sédimentaires en sous-sol qui réfléchissent les ondes. Morlet adapte les « transformées de Fourier à court terme » de Dennis Gabor, élaborées en 1946 par ce physicien dans le cadre des théorisations du signal et de l'information, en pleine construction³⁹⁵. Morlet élabore un instrument qui permet l'analyse temps-fréquence des signaux sismiques. L'analyse temps-fréquence est en fait un enjeu essentiel du traitement du signal car, comme l'affirme Pierre-Gilles Lemarié-Rieusset : « Dans l'étude des signaux transitoires, qui évoluent dans le temps d'une façon imprévisible, la notion d'analyse fréquentielle ne peut être que locale en temps »³⁹⁶.

Morlet construit une nouvelle transformation pour l'analyse temps-fréquence et des méthodes numériques concrètes qui montrent son efficacité. Ces travaux n'auront pas de suite chez Elf Aquitaine : les « camions-vibrateurs » avec leurs capteurs ne font pas recette dans un contexte qui vient de voir le fiasco des « avions renifleurs »³⁹⁷. Mais l'instrument va être ensuite

³⁹² Les hommages aux multiples contributeurs de la théorie des ondelettes ont été des occasions de publier beaucoup de ces points de vue : (Kahane et Lemarié-Rieusset 1998; Meyer 2008; Cohen 2011; Farge et al. 2013).

³⁹³ Les éléments biographiques sur Morlet sont rares. Morlet est un polytechnicien (X52), ingénieur de recherche depuis 1958 au service de la Compagnie d'Exploration Pétrolière, devenue Elf. C'est un spécialiste de géophysique, orientée sur l'exploration pétrolière, de stature internationale, qui a reçu le Prix Reginald Fessenden de la Society for Exploration-Geophysicists en 1997 pour ses travaux.

³⁹⁴ « Wave propagation and sampling theory », publié en deux parties : (Morlet et al. 1982a; Morlet et al. 1982b).

³⁹⁵ Morlet fait référence au texte de Gabor sur la transformée de Fourier, appelée « à fenêtre glissante » ou encore « transformée de Gabor » (Gabor 1946). Le physicien Dennis Gabor est connu pour ses travaux en holographie, théorie de la communication et en optique de Fourier, nous avons discuté rapidement cet aspect de ses contributions, voir note 361.

³⁹⁶ Lemarié-Rieusset est un mathématicien spécialiste des ondelettes, co-auteur avec Jean-Pierre Kahane de l'ouvrage *Séries de Fourier et ondelettes* qui marque une double filiation : entre l'analyse de Fourier et la théorie des ondelettes d'une part, et entre la génération du mathématicien et grand spécialiste de l'analyse harmonique J.P. Kahane et ses élèves, au sens large, que sont Yves Meyer et Georges-Marie Lemarié-Rieusset. (Kahane et Lemarié-Rieusset 1998).

³⁹⁷ Entre 1975 et 1979, la société Elf s'est laissée bernée au sujet d'un appareil soi-disant miraculeux de détection aérienne de gisements de pétrole. En plein choc pétrolier, l'idée a séduit quelques responsables chez Elf. Le scandale a éclaté par voie de presse le 21 décembre 1983 dans le *Canard Enchaîné*. D'après ce qui a été écrit sur

travaillé et perfectionné, avec son collègue et ami géophysicien Pierre Goupillaud (1918-2015), en collaboration avec Alex Grossmann, un physicien théoricien au Centre de Physique Théorique du CNRS à Marseille³⁹⁸. Leurs travaux donnent une assise théorique et mathématique à ce que Morlet avait dessiné empiriquement, entre intuitions et efficacité pour la résolution du problème concret. À leur suite, le mathématicien Yves Meyer introduit une base d'ondelettes en 1985 et inscrit l'ensemble dans ce qui devient une véritable théorie des ondelettes dont la portée mathématique dépasse alors complètement le cadre initial de la géophysique³⁹⁹. La « transformée en ondelettes rapide » (ou « Fast Wavelet Transform » FWT) de Stéphane Mallat⁴⁰⁰ amène de nouveaux outils algorithmiques et informatiques pour en faire un instrument à la fois générique et pratique : la FWT supplante la FFT en une décennie.

En quelques années les ondelettes sont devenues un instrument très efficace du traitement du signal, un « microscope mathématique »⁴⁰¹ pour reprendre la formule du mathématicien Albert Cohen soulignant ainsi son caractère très opératoire. Dès la fin des années 1980, c'est un domaine de recherche à part entière, un carrefour de disciplines, un réseau de mathématiciens et de chercheurs de tous horizons qui s'étend très vite. Les ondelettes constituent en quelque sorte un langage commun à de multiples disciplines qui adoptent ce point de vue. L'histoire des ondelettes est celle d'un instrument né de la rencontre de problèmes concrets et de savoirs mathématiques hérités de l'analyse de Fourier, perfectionné par des ingénieurs, physiciens et mathématiciens. Elle ajoute encore des noms sur la longue liste de praticiens des mathématiques, en partie oubliés, et prolonge le chantier historiographique des instruments de Fourier à l'aube du 21^{ème} siècle.

Morlet, celui-ci a été mis à la retraite par Elf lorsqu'il a proposé son projet de « camion-vibrateur » pour sa méthode d'analyse des sols.

³⁹⁸ Leur collaboration dure jusqu'en 1989 au moins, avec la publication d'une quinzaine d'articles, dont le plus important pour la circulation des résultats est celui de 1984 (Grossmann et Morlet 1984).

³⁹⁹ Yves Meyer est le mathématicien le plus reconnu dans cette histoire récente. Ses travaux sur les ondelettes lui ont valu de multiples prix internationaux, le dernier et plus prestigieux étant le Prix Abel en 2017.

⁴⁰⁰ S. Mallat est polytechnicien, et en cours de PhD en « Electrical Engineering » à l'University of Pennsylvania en 1985 quand il débute ses travaux algorithmiques sur les ondelettes. Il obtient son PhD en 1988 et publie la base de la FWT en 1989 : (Mallat 1989).

⁴⁰¹ (Cohen 2011, p. 29).

V. Les transformations électroniques de l'instrumentation dans les années 1970

Dans la fabrique de la spectroscopie FTIR et de la cristallographie par diffraction de rayons X, dans de multiples instruments mathématiques contemporains déjà évoqués, l'électronique est apparue pour assurer diverses fonctions : calculs et traitements mathématiques des résultats, automatisation et contrôle de l'instrument, amplification des signaux, conversion analogique-numérique. L'alliance des matérialités électroniques et des savoirs mathématiques est une donnée importante de l'évolution de ces instruments. Le développement de la FFT et des ordinateurs en a renforcé les liens et rendu ce duo toujours plus indispensable. À tel point qu'un résultat expérimental d'analyse spectrale est pétri de traitements mathématiques, d'autant plus que l'instrument a des capacités électroniques embarquées. Qu'en est-il à l'échelle plus globale de l'instrumentation contemporaine hors du registre des instruments de Fourier ? Une petite précision s'impose ici, pour cette partie traitant de l'instrumentation contemporaine : en effet le terme instrumentation est à double-sens, celui que nous avons défini comme processus de genèse instrumentale, et celui très technologique recouvrant les techniques de conception de systèmes de commande, de mesure, d'action, en assemblant des instruments, des capteurs et des actionneurs. Le sens technologique est au plus proche du discours et des conceptions portés par les acteurs de cette histoire. Dans les deux cas il s'agit de conception d'instruments, le recoupement ne devrait pas altérer la compréhension des enjeux contemporains, et nous préciserons les nuances lorsque cela est nécessaire.

Comment alors l'alliance entre électronique et mathématiques évolue-t-elle au-delà des développements de la FFT, dans les années 1970 et selon quels déterminants ? Étant donné la très grande diversité de l'instrumentation contemporaine, il n'est pas simple d'obtenir des réponses globales, nous allons ici circonscrire la problématique, apporter quelques éléments de réponses et encore une fois poser des jalons pour une analyse des transformations électroniques dans la décennie 1970.

Pour préciser les enjeux de ces interrogations épistémologiques et historiques, rappelons quelques éléments de contexte. Tout d'abord, si l'électronique compte dans les matérialités nouvelles des instruments, il faut bien souligner qu'elle se superpose aux autres dimensions artéfactuelles de l'instrument. Pour le dire autrement, l'électronique ne remplace ni l'interféromètre, ni les sources de rayons X, ni les antennes radioastronomiques. Même dans ses fonctions spécifiquement calculatoires, elle compose avec des matérialités diverses, aussi bien mécanique qu'optique, vues sur les exemples des instruments de Fourier.

Deuxièmement, en matière d'électronique, deux grandes technologies et principes de fonctionnement ont été inventés au 20^{ème} siècle⁴⁰² : l'électronique analogique et l'électronique numérique, dont l'ordinateur est une forme particulièrement répandue, mais qui ne s'y résume pas. Les deux technologies coexistent encore aujourd'hui, entre complémentarité et concurrence, avec des hybridations qui prennent des formes différentes d'une filière à l'autre.

⁴⁰² Il existe une historiographie importante sur l'histoire de l'électronique dans ses aspects technologiques, industriels et économiques (Ernest Braun et MacDonald 1978; P. R. Morris 1990; Riordan et Hoddeson 1997; Chandler 2001). Beaucoup d'autres ouvrages sont dominés par les considérations sur les télécommunications et l'électronique grand public, aspects les plus spectaculaires et populaires des transformations électroniques au 20^{ème} siècle, mais qui ne nous intéressent pas directement ici.

L'autre grande dichotomie technologique en électronique tient à la nature des composants : les tubes électroniques ont été inventés au début du 20^{ème} siècle et constituent quasiment la seule électronique existante jusqu'au développement de l'électronique à semi-conducteur, dont le principal composant est inventé en 1947, le transistor⁴⁰³. L'électronique à base de semi-conducteur, et tout particulièrement de silicium, s'impose très lentement dans les années 1950, puis de manière spectaculaire dans tous les domaines après 1960 : l'invention du circuit intégré en silicium, autour de 1959, est le moteur de la miniaturisation sans précédent de ces techniques sous forme de « puces » électroniques. La loi de Moore est la règle qui imprime une cadence sans précédent dans l'histoire des techniques, dans toute l'industrie microélectronique⁴⁰⁴. Tous les deux ans environ, la taille des circuits intégrés est divisée par deux, en même temps que leur puissance de calcul est doublée.

Aujourd'hui, au 21^{ème} siècle, l'électronisation des instruments semble aller de soi, mobilisant des matériels microélectroniques sous forme de puces programmables et des logiciels pour piloter, calculer, automatiser, contrôler, traiter l'information. Une bonne partie de ces ingrédients est disponible sur le marché et transposable, échangeable d'un système à l'autre. C'est la base technologique qui permet de créer des instruments ressemblant à des boîtes toutes similaires, des « boîtes noires » au sens où leur fonction ne transparaît pas dans leur aspect extérieur. Miniaturisation des circuits électroniques et invisibilisation de la complexité des traitements automatisés assurés par l'électronique sont des tendances à historiciser d'une part, à intégrer dans nos réflexions d'autre part.

Prenons un exemple récent de développement d'un instrument numérique, au Laboratoire National d'Essai (LNE) : le wattmètre étalon qui sert de référence à l'échelle nationale pour les mesures de puissance électrique, conçu en 2003 sur un principe désormais numérique écartant les méthodes classiques de pont de comparaison. Dans les motivations affichées à propos de ce changement de principe instrumental, on trouve de quoi nourrir les interrogations sur cette longue histoire de l'électronisation des instruments. Selon les termes des concepteurs⁴⁰⁵ :

Depuis quelques décennies, la convergence des progrès techniques dans les domaines des mathématiques (l'invention des algorithmes de transformée de Fourier rapide), de l'électronique et de la micro-électronique (par exemple, la réalisation de convertisseur analogique-numérique de plus en plus performants) et de l'informatique (l'augmentation de la capacité de calcul des microprocesseurs) ont contribué à un essor considérable du traitement numérique des signaux. Même si le traitement analogique des signaux électriques continue à occuper une place importante dans le domaine de la métrologie, la part prise par le numérique ne cesse de croître.

L'exemple est tout à fait symbolique des transformations contemporaines qui sont au carrefour des mathématiques, de l'électronique et de l'informatique. Il faut bien préciser où se situe l'avantage de cet instrument désormais numérique : l'incertitude de mesure n'est pas

⁴⁰³ La technique des tubes électroniques à vide débute avec la valve ou diode (1903) de John Fleming et la triode (1907) de Lee de Forest. Plusieurs types de transistors ont été inventés. En décembre 1947 est inventé le transistor à pointe, qui n'a pas eu de véritable succès industriel, puis le transistor à jonction, dont le principe est défini en février 1948, produit à partir de 1950. C'est le premier composant semi-conducteur vraiment important, après les diodes en germanium et silicium, qui est surtout utilisé pour l'électronique analogique. Avec le procédé de circuit intégré, d'autres transistors voient le jour, en particulier celui qui est au cœur de toute l'électronique numérique, le MOSFET des années 1960.

⁴⁰⁴ (Harsha et al. 2004; Mody 2017).

⁴⁰⁵ (Espel 2007, p. 4).

nécessairement plus faible avec le wattmètre numérique, seulement, dans la pratique, la précision des mesures est meilleure, l'instrument est plus facile à mettre en œuvre et il coûte moins cher. L'artefact incorpore par ailleurs une variante d'algorithme de FFT, 40 ans après la description de l'original par Cooley et Tukey. L'exemple montre le caractère très générique de ce mode de traitement de l'information, reposant sur un calcul quasiment instantané de la transformée de Fourier, et profondément relié à la matérialité de l'électronique numérique, ici sous forme de microprocesseur, c'est-à-dire d'une puce électronique en silicium et programmable.

Cet exemple ne donne qu'une vision très raccourcie du long processus historique d'électronisation de l'instrumentation. Mais la fabrique de la spectroscopie FTIR nous avait montré un processus similaire sous bien des aspects, plus adjacent à la conception de la FFT et qui se déroule selon une chronologie différente. Les transformations de la FTIR vers le « micro », signifiant à la fois microprocesseur et micro-ordinateur, remontent aux années 1970. Sa miniaturisation et la mise en « boîte noire » est entamée dans les années 1980, et nous avons indiqué que la mise à distance des complexités du traitement mathématique de l'interférogramme avait été une condition de son succès commercial, hors de la communauté des physiciens spécialisés en spectroscopie.

Ceci explique pourquoi nous allons retourner dans les années 1970, dans une période qui semble charnière dans les transformations électroniques de l'instrumentation, après la FFT élaborée en 1965 et avant la généralisation de l'instrumentation numérique. Les racines de ces développements vers l'électronique numérique sont antérieures à 1970, mais l'électronisation semble trouver son plein essor dans les années 1970, avec l'implémentation des algorithmes de FFT déjà bien connus. C'est aussi la période de la montée en puissance des « micros » puisque le microprocesseur est inventé au tournant de 1970 et commercialisé en 1971 ; le micro-ordinateur est un produit des années 1970, même si sa très large diffusion est postérieure à l'invention de l'IBM PC en 1980 qui fixe un standard du domaine.

En explorant la période des années 1970, nous sortirons des limites des instruments de Fourier, mais il faut souligner que, au-delà de l'évocation de la FFT, ils ont une place à part dans ce processus d'électronisation. À telle enseigne que le chapitre « Théorie et traitement numérique des signaux donnés par les appareils analytiques » de la revue technique professionnelle de référence *Les Techniques de l'ingénieur* est confiée en 1977 à trois experts : Patrick Bouchareine, Janine Connes et Hervé Delouis, du Laboratoire Aimé Cotton et du CIRCE, tous spécialistes de spectroscopie FTIR, dans toutes ses dimensions optiques, calculatoires, théoriques et pratiques. Ils écrivent⁴⁰⁶ :

Depuis sa création au niveau d'un capteur jusqu'à sa mise à la disposition de l'expérimentateur, ce signal passe à travers les éléments d'une chaîne de mesure (transducteurs, amplificateurs) qui lui font subir un certain nombre d'altérations systématiques (traînées, retards) et aléatoires (bruits, signaux parasites). C'est pour remédier, autant qu'il est possible, à ces altérations que les techniques de traitement du signal sont mises en œuvre ; une bonne connaissance des lois fondamentales est nécessaire pour tirer, d'un montage expérimental donné, la totalité de l'information disponible. L'amélioration du signal est souvent obtenue en incorporant, dans la chaîne de mesure, des éléments qui corrigent celle-ci par voie analogique (filtres), mais la multiplication, et la puissance des ordinateurs permet,

⁴⁰⁶ (Bouchareine, Connes et Delouis 1977).

de plus en plus fréquemment, de faire des traitements à posteriori (sic.) plus efficaces et mieux optimisés.

Même lorsque le traitement numérique n'est pas nécessaire, la numérisation améliore la dynamique d'une chaîne de mesure, c'est-à-dire le rapport du plus grand signal admissible au plus petit signal détectable (un voltmètre analogique ne dépasse guère 1000, un voltmètre numérique peut atteindre 10^7).

Electronisation rime ici avec numérique, entre filtres électroniques et moyens informatiques, et l'affirmation d'un traitement numérique qui « n'est pas nécessaire » résonne fortement avec l'exemple précédent du wattmètre numérique. Cet exemple, étant donné les rédacteurs de la revue, incite à poser cette question : à quel point les instruments de Fourier constituent-ils une matrice des transformations de l'instrumentation dans les années 1970 ? La question est difficile et nous n'aurons que des réponses partielles à apporter pour l'instant, mais elle doit intégrer l'horizon de nos interrogations épistémologiques et historiques.

Nous allons dans un premier temps explorer la variété de l'instrumentation dans la décennie 1970, pour le monde scientifique et industriel, en tentant d'analyser les combinaisons d'électronique et de savoirs mathématiques dans l'instrumentation. Nous examinerons les transformations selon trois angles complémentaires, avec un fort centrage sur le contexte français des années 1970, préliminaires à ce qui pourrait être une recherche de long terme très ambitieuse, en contexte élargi. Les trois angles ont pour point commun de nous situer d'emblée au carrefour de l'électronique, de l'informatique, des automatismes, entre le monde scientifique et industriel. Nous ne sommes plus dans la situation des années 1940 où les cristallographes inventaient eux-mêmes leurs systèmes de calcul de Fourier, ni dans celle des années 1960, contrainte par les systèmes informatiques gigantesques uniquement disponibles dans des centres de calcul. Après 1970, les artefacts de l'électronique numérique sont des produits industriels, en particulier des puces génériques et adaptables à différents projets. Le microprocesseur devient rapidement un produit commercialisé à grande échelle qui se diffuse dans tout le tissu industriel et scientifique, avec des fonctions très ouvertes et non prédéterminées. Il est lui-même le produit d'une convergence entre microélectronique et informatique, attendu qu'Intel le commercialise très tôt dans les années 1970 comme un « ordinateur sur une puce »⁴⁰⁷. L'instrumentation devient en partie un processus d'appropriation de techniques électroniques et informatiques existantes ou réadaptées.

Le premier angle que nous choisissons vise à prendre le pouls des transformations en cours à une grande échelle, en explorant les évolutions de l'instrumentation et l'électronique par le biais de quelques revues professionnelles. Nous avons exploré systématiquement deux revues principalement : *Electronique et microélectronique industrielles* (1971-1976), renommée *Électronique et applications industrielles* (1976-1980) ; *Automatique et informatique industrielles*, publiée entre 1971 et 1980. Ces deux revues fusionnent dans *Électronique industrielle* en 1980 et elles font partie d'un spectre large de revues dédiées à l'électronique. Elles sont un point d'entrée dans une vaste littérature sur l'électronique et la

⁴⁰⁷ En novembre 1971 la publicité d'Intel pour ses microprocesseurs dans *Electronics News* affiche : « Announcing a new era of integrated electronics... a microprogrammable computer on a chip ». Ce n'est pas exactement au sens d'« ordinateur » tel que nous l'entendons aujourd'hui qu'il faut l'interpréter, mais comme ordinateur « microprogrammable », ce qui est une catégorie de la mini-informatique au tournant de 1970.

microélectronique, dans leurs fondements et leurs applications⁴⁰⁸. Nous avons complété ponctuellement ces explorations avec les revues *Automatisme* et *Toute l'électronique* permettant d'éclairer, par leurs comptes-rendus, les événements que sont les salons comme le Sicob ou les congrès Mesucora⁴⁰⁹.

Ces explorations nourrissent un panorama utile pour un deuxième angle d'analyse très resserré sur l'exemple de la conception d'un instrument singulier : le système Micral. Ce cas d'étude approfondi, sur la période 1970-74, montre le mode de conception d'une instrumentation avec les nouvelles technologies du microprocesseur. Le Micral est connu pour sa double facette puisqu'il est conçu initialement comme instrument scientifique et qu'il est devenu le premier micro-ordinateur de l'histoire de l'informatique⁴¹⁰. Nous nous attarderons uniquement sur l'instrument, produit de plusieurs compromis électroniques et informatiques, incorporant des fonctions mathématiques simples à la mesure de la fonction agronomique qui est celle du commanditaire de l'instrument : l'Institut National de Recherches Agronomiques (INRA). Cette étude de cas montrera que si le microprocesseur et l'électronisation sont devenus des évidences dans la conception instrumentale par la suite, le processus de conception du Micral en constitue un balbutiement remarquable par les effets de miniaturisation et d'automatisation qu'il promeut.

Dans un troisième volet d'analyse nous suivrons la trajectoire d'un physicien, Claude Morillon, devenu professeur à la chaire d'Instrumentation scientifique au Cnam en 1982. Or Morillon a été chercheur au Laboratoire Aimé Cotton depuis 1964, travaillant sur la spectroscopie FTIR. Son parcours nous a paru être un levier pour analyser les modalités de l'enseignement et de l'institutionnalisation du sujet de l'instrumentation numérique, au tournant de 1980, à l'échelle nationale : la chaire créée au Cnam est, à notre connaissance, la toute première en France sur ce sujet. L'ensemble des résultats fournis par nos trois angles d'analyse constituent une amorce et un préliminaire à des recherches sur les acteurs, les lieux, les modalités des transformations numériques dans l'instrumentation, du point de vue épistémologique et institutionnel.

A. L'instrumentation et l'électronique dans les revues professionnelles

En nous situant, en premier lieu, au carrefour de l'électronique, de l'informatique industrielle et de l'instrumentation, au filtre des revues professionnelles, nous pouvons dresser quatre principaux constats.

Le premier constat est que dans ce domaine de l'instrumentation, pour le monde scientifique et le monde industriel, le basculement sémantique vers le « numérique », au détriment de l'analogique, s'accélère au fil de la décennie. Si on s'en tient aux deux revues les plus analysées, le renversement est même très rapide entre 1972 et 1974 (à l'image de l'annonce publicitaire très tranchée de 1974, voir Figure 58). Le champ lexical se polarise progressivement sur le numérique, enrichi par un cortège de notions :

⁴⁰⁸ Par ailleurs nous avons pu interviewer Henri Lilen en 2016, auteur et rédacteur en chef des revues *Automatique et informatique industrielle* et *Electronique et microélectronique* sur la période qui nous intéresse.

⁴⁰⁹ Sicob (Salon des industries et du commerce de bureau) est un salon annuel de professionnels de l'informatique, grand rendez-vous des fabricants et utilisateurs. Le premier Sicob remonte à 1950. Mesucora est à la fois un salon des constructeurs d'instruments et un congrès international, coordonné par les organisations syndicales professionnelles du secteur. Il s'est tenu à Paris en 1973, 1976 et 1979.

⁴¹⁰ (Petitgirard 2019; Lazard et Mounier-Kuhn 2016).

- la précision des mesures, signifiant qu'un gain en précision est potentiellement ou effectivement réalisé dans les instruments numériques ;
- la capacité de mémorisation des systèmes numériques ;
- la souplesse des ensembles numériques pour une plus grande diversité d'usages ;
- une perspective que nous pourrions appeler « multi », correspondant au fait que l'électronique numérique permet de suivre de multiples paramètres simultanément, sur de multiples canaux
- surtout la capacité à calculer et traiter mathématiquement des données acquises par l'instrument.



Figure 58 - Publicité dans la revue *Automatique et informatique industrielle*, n°28 juin 1974

Chacun de ces points a un contre-point, puisque les avantages et inconvénients du numérique sont discutés et pondérés par ceux de l'analogique. Par exemple l'électronique analogique a encore l'avantage de la rapidité d'exécution, mais elle est contestée par le développement exponentiel des puces numériques, du microprocesseur en particulier. L'accélération vers le numérique renvoyée par cette exploration des revues autour de 1974 n'est probablement pas sans rapport avec l'arrivée d'une deuxième génération de microprocesseurs. Le second point fort de l'analogique réside dans les systèmes de visualisation de résultats de mesure, en particulier l'oscilloscope. Mais même les mouvements de l'aiguille sur un cadran analogique permet parfois de suivre plus facilement les variations ou tendances des variations d'un phénomène mesuré, qu'un compteur avec des chiffres qui changent trop rapidement pour l'observateur.

Le deuxième constat est celui d'une dynamique parallèle des technologies électroniques et des fonctions des instruments (de mesure). Les instruments se diversifient dans leur fonction au fur et à mesure que l'électronique facilite ces extensions. Dans un enthousiasme débridé un des rédacteurs de ces revues écrit : « L'électronique a ouvert les portes à de nouvelles méthodes

de mesure rompant définitivement avec celles qui ont prévalu tout au long de l'histoire »⁴¹¹. La mesure entre dans au moins trois grandes fonctions, pour lesquelles l'électronique devient indispensable : l'acquisition d'informations sur un phénomène, le contrôle de processus, la régulation d'un processus. Dans le premier cas, les opérations de mémorisation et la rapidité de l'acquisition sont importantes. Dans le second, la situation est différente au sens où il s'agit du contrôle d'un processus de production dans lequel les mesures sont confrontées à des valeurs de paramètres optimales et connues à l'avance. Ce qui est recherché, c'est l'exploitation des mesures, en temps réel si possible. Enfin la régulation associe la mesure à l'action corrective sur le processus, quand le résultat de la mesure s'écarte de ce qui est prévu.

Dans tous les cas, l'électronisation est synonyme de développement des capteurs qui réalisent une opération très précise : obtenir une information mise sous forme de signal électrique analogue au paramètre mesuré sur le phénomène. L'amplitude et les variations du signal électrique doivent se conformer à celles de la grandeur mesurée. La question des capteurs⁴¹² devient un chapitre central de toute l'instrumentation et de son électronique, quelle que soit la technologie électronique utilisée, analogique ou numérique. L'étape de captation est incontournable, puisque l'électronique ne traite que des signaux électriques. Le couplage entre capteur et traitement électronique de l'information mise sous forme électrique, est la base de ce que les acteurs de l'instrumentation qualifient de « nouvelle méthode » de mesure.

Vu des acteurs du terrain, qu'est-ce que l'électronique apporte dans les instruments de mesure ? En étant un peu schématique, quatre fonctions sont particulièrement activées par l'électronique. La première est la possibilité d'amplifier des signaux grâce aux composants électroniques actifs, le plus important d'entre ces composants étant le transistor. C'est ce qui permet de détecter des signaux très faibles dans tout type de mesure, au prix d'un lourd traitement du rapport signal sur bruit ensuite.

La deuxième fonction de comptage d'impulsions électriques est réalisée par des puces électroniques numériques qui ont totalement remplacé les tubes électroniques. La troisième est la possibilité de mémoriser et visualiser des résultats, de manière analogique ou numérique. Il reste toujours un compromis à trouver car si le numérique accélère et automatise l'acquisition des données, leur visualisation, dans ces années 1970, nécessite une transformation numérique-analogique, pour représenter graphiquement, ou sur l'oscilloscope, l'allure des phénomènes. Enfin, quatrième fonction, celle qui nous intéresse le plus, est celle du calcul : depuis les opérations algébriques élémentaires d'addition et de multiplication, jusqu'au traitement complexe de l'information en passant par les corrections de linéarité, les filtrages, l'analyse de spectre, le calcul intégral pour évaluer des vitesses ou des accélérations, etc. Là encore, les calculs peuvent être faits par des circuits analogiques qui simulent les opérations, ou à partir de technologies numériques, avec un ordinateur ou sur des puces spécialisées. La coordination de l'ensemble de ces fonctions pourrait correspondre en elle-même à une cinquième fonction, tant elle est décisive de l'automatisation, de la précision, de l'adéquation d'un système instrumental

⁴¹¹ Dans le numéro spécial « Instrumentation » de la revue *Automatique et informatique industrielle*, n° 25, mai 1974.

⁴¹² Sur la question des capteurs, « sensors » en anglais, nous avons identifié un grand nombre d'ouvrages qui couvrent le développement dans tous les domaines depuis les capteurs de pression et températures jusqu'aux capteurs biomédicaux. Il existe également une Commission Interministérielle des Appareils Electriques et Electroniques de Mesure (CIAME) qui édite des rapports sur les capteurs fabriqués en France en 1972, 1974, 1976 et 1979.

à une expérience ou un processus de mesure. Mais cela relève du mode de conception des instruments plus que des possibilités intrinsèques de l'électronique.

Le troisième constat que nous pouvons faire c'est celui de l'omniprésence de la mini-informatique dans le domaine de l'instrumentation dès lors qu'il s'agit d'automatiser tout ou partie de l'instrument. L'informatique se cache derrière l'automatique ou dans les puces comme le microprocesseur : c'est un triomphe de l'ombre. Cette informatique, pour le dire brièvement, est gage d'efficacité, de fiabilité, de rapidité et de simplicité de mise en œuvre de l'instrumentation. Tel est le credo des principaux équipementiers de mini-informatique qui servent le domaine de l'instrumentation. Les entreprises Digital, Data General, Hewlett-Packard, Varian, IBM, Télémécanique et la CII sont les plus actifs et les plus présents sur le marché français des années 1970⁴¹³. Les stratégies, les modes de conception, les trajectoires technologiques de ces constructeurs demanderaient à être analysés dans le détail pour comprendre toutes les articulations entre mini-informatique et instrumentation.

En guise de préliminaire à notre étude de cas sur R2E, et après avoir établi le quatrième constat, nous reviendrons sur l'histoire de deux entreprises françaises, embarquées dans les mutations de l'instrumentation autour de la mini-informatique : Informatek, parce que c'est une entreprise créée à l'aube des années 1970, et Intertechnique, parce que c'est une entreprise qui a pris le virage de l'instrumentation très tôt dans les années 1960 et qu'elle constitue en quelque sorte le berceau de R2E.

Le quatrième constat est celui de la place de plus en plus importante prise par le microprocesseur dans l'instrumentation, après une première phase de doutes. La décennie est pour ainsi dire coupée en deux. La faible puissance des microprocesseurs avant 1975, relativement aux performances de la mini-informatique, nourrit beaucoup d'interrogations sur son utilisation potentielle. À l'échelle globale, la prise de conscience de l'importance du microprocesseur est très forte à partir de 1974-75 en France. Les constructeurs d'instruments comme Hewlett-Packard sont déjà sur la brèche : la firme annonce que « 80% de l'instrumentation électronique utilisera des microprocesseurs »⁴¹⁴ en 1976. Ce qui correspond à un positionnement stratégique de Hewlett-Packard à plusieurs niveaux : des composants électroniques à l'ingénierie des systèmes, des calculatrices et ordinateurs jusque dans l'instrumentation électronique de laboratoire et d'analyse. Hewlett-Packard fait partie des partisans de l'option « micro », qui n'est pas partagée par tout le monde encore en 1974. À tout le moins, la stratégie de ce groupe déjà fortement mondialisé interroge quant aux réserves des constructeurs français en matière d'instrumentation à microprocesseur.

Les doutes sont associés à une forme d'incertitude quant à l'artefact microprocesseur, sur les opérations possibles avec celui-ci et les fonctions imaginables. Il a été inventé par Intel vers 1969, et le premier modèle Intel 4004 est commercialisé en 1971, mais il n'a que des fonctionnalités limitées : c'est un microcontrôleur, utilisable pour faire des calculatrices de bureau, mais très peu d'électroniciens, encore moins d'informaticiens, ne voient de perspectives avec le 4004. La commercialisation de l'Intel 8008, premier véritable microprocesseur ouvre un peu plus l'horizon en 1972. Néanmoins il reste associé à la firme Intel qui est avant tout un

⁴¹³ Télémécanique et CII sont les seules compagnies françaises réellement présentes. La CII est le « champion national » création politico-industrielle du Plan Calcul échafaudé durant la période gaullienne, inauguré en 1967, pour espérer rattraper le retard en matière informatique sur IBM. (Pierre Mounier-Kuhn 2010).

⁴¹⁴ Dans la revue *Automatique et informatique industrielle*, n° 41, novembre 1975.

fabricant de mémoires électroniques en semi-conducteur. Les mémoires Intel équipent les mini-ordinateurs, et dans les services de conception ces mémoires sont des produits bien connus et intégrés dans les ordinateurs. D'une certaine manière le microprocesseur ne gagne ses lettres de noblesse, en France, qu'avec la multiplication des fabricants et des modèles de microprocesseurs : AMD, Motorola, Fairchild, Texas Instrument, National Semiconductors rejoignent Intel parmi les fabricants, et ils seront près de 30 fabricants en 1975⁴¹⁵.

D'un côté le microprocesseur prolonge les fonctions électroniques déjà acquises en instrumentation : facilitation, automatisation des fonctions, élaboration des résultats de mesure, gain en précision, possibilité de faire toutes sortes de calculs et comparaisons avec des résultats pré-mémorisés. D'un autre, l'instrumentation utilisant le microprocesseur s'apparente de plus en plus à de la conception de petits systèmes, intégrant plus de fonctions dans un même ensemble instrumental, programmable mais avec de nouvelles contraintes par rapport aux mini-ordinateurs existants pour ce même type de programmation. L'effet collatéral identifié par les acteurs c'est qu'il faut être capable de concevoir des systèmes complets plus que des instruments isolés. Or l'ingénierie et l'expertise dans l'assemblage de systèmes semblent manquer dans la France des années 1970, c'est ce qui transparaît à la lecture des revues professionnelles. C'est un des intérêts de s'arrêter sur les trois exemples d'Informatek, Intertechnique et surtout R2E dont le cœur de métier sera la conception de ces systèmes.

B. Deux entreprises de l'instrumentation en France : Informatek et Intertechnique

1. Informatek et l'imagerie médicale

Informatek est une petite entreprise de l'imagerie médicale fondée en 1971 par le physicien Charles Zajde⁴¹⁶. Il porte un projet de système de traitement d'images pour la scintigraphie s'inscrivant dans un créneau non pourvu par les industriels de l'instrumentation déjà installés. Face aux difficultés à s'installer en propre en France Informatek s'associe à Varian aux États-Unis pour lancer son système, puis le commercialiser en France avec succès. Informatek est hébergée par la filiale de Varian dans la zone d'activité des Ullis, à côté d'Orsay dans le sud de Paris et à deux pas de la future installation de R2E. La stratégie internationale d'Informatek lui permet d'accéder aux mini-ordinateurs Varian pour le cœur du système d'imagerie⁴¹⁷ : le Varian 620i est rebaptisé « Matek 1026 » pour la commercialisation en France. Dans un second temps, Informatek développe des produits pour la médecine, l'instrumentation physique et prendra plus tard un chemin tout autre, celui de la gestion pour les entreprises⁴¹⁸.

⁴¹⁵ (Malone 1995).

⁴¹⁶ Ingénieur de l'Ecole supérieure d'Electricité (1959), il a fait une thèse en physique sous la direction d'Yves Rocard (« Étude, réalisation et mise au point d'un détecteur multicanaux ») en 1963. C'est un spécialiste de l'instrumentation en médecine nucléaire.

⁴¹⁷ Le Varian 620i est un ordinateur de la firme Varian Data machines, une division de Varian Associates présente dans la Silicon Valley, et dédiée à la conception de mini-ordinateurs. Le 620i a une conception modulaire et flexible qui permet de concevoir des systèmes génériques ou des systèmes de contrôle, des systèmes d'acquisition temps réel, des systèmes de calcul scientifique.

⁴¹⁸ Toujours à base de mini-ordinateurs : Varian (pour les Matek 1026 et 1037) et CII (Mitra 15 dérivé en Matek 1500), avec des périphériques de Logabax et Sintra. Informatek fait l'objet de plusieurs articles dans les revues *Electronique et microélectronique industrielles* et *Automatique et informatique industrielles* en 1974 et 1975. L'orientation vers la gestion peut paraître surprenante, elle est liée en réalité à l'expertise acquise sur

L'appareil de scintigraphie à l'origine du démarrage d'Informatek est prototypé en 1971, développé en système complet et opérationnel en 1974. On peut spécifier les fonctions opérées par le mini-ordinateur et l'effet des transformations numériques. Du côté de l'acquisition de données tout d'abord : dans les systèmes antérieurs les résultats des scintigraphies sont photographiés, puis enregistrés sur bande magnétique pour pouvoir être transmises et traitées par un ordinateur sur un autre site, afin d'être visualisées. Le système Informatek est conçu pour intégrer toutes les fonctions d'acquisition, de traitement des données, de visualisation et d'archivage en fichier informatique. En outre, il ouvre de nouveaux usages de la scintigraphie du fait de sa capacité de traitement et de calcul temps réel, de visualisation immédiate des résultats et des multiples fonctionnalités ajoutées comme les agrandissements, les coupes dans les images, etc.

Le développement logiciel est à double facette : les aspects très techniques du traitement de l'information et de l'image, d'une part, et le développement d'un système d'interface utilisateur, d'autre part. La technicité des opérations numériques s'efface progressivement pour l'utilisateur, qui n'a plus à connaître les détails des opérations pour utiliser l'instrument. C'est une étape intermédiaire vers les instruments « boîtes noires », très représentative des enjeux de conception des instruments des années 1970 et de l'importance du jalon de la mini-informatique. A titre indicatif et tout à fait symbolique, il faut souligner que Zajde recrute un mathématicien, Marc Sauce : ce dernier a fait une thèse en mathématiques appliquées à l'Université de Lyon, sous la direction du mathématicien Gustave Malécot (1911-1998), portant sur l'analyse des photomultiplicateurs.

Informatek suit une trajectoire singulière, mais qui signe une vitalité et une dynamique de l'automatisation dans le domaine de l'instrumentation en médecine nucléaire au tournant de 1970. Sur le plan du mode de conception de l'instrument, on peut faire le rapprochement avec le spectroscope FTS-14 de Digilab, commercialisé en 1969 et dont nous avons présenté les modalités de conception⁴¹⁹. Il utilise le même Varian 620i comme mini-ordinateur central, il est traversé par les mêmes enjeux de haute technicité algorithmique pour le calcul de transformée de Fourier, et d'invisibilisation des complexités techniques pour l'utilisateur, véritable enjeu commercial pour Digilab. Sur cette base s'ajouteront les modalités de traitement automatisé du spectre, grâce à l'électronique numérique et les moyens informatiques, et feront du FTS-14 un bestseller des années 1970. Pour analyser plus finement ces processus, il resterait à entrer dans les modes de conception, dans l'organisation interne de l'entreprise Informatek, dans ses modes de formation et de veille technologique, dans ses relations aux utilisateurs et acheteurs.

2. Intertechnique, de l'aéronautique à l'instrumentation

Notre second exemple est l'entreprise Intertechnique fondée en 1951 comme équipementier aéronautique, filiale de la société Dassault⁴²⁰. De sous-traitant pour Dassault,

l'instrumentation en matière de gestion de données en masse, expertise convertie dans le domaine de la gestion de données au service des entreprises.

⁴¹⁹ Voir page 112.

⁴²⁰ (Darrieulat 1993) a produit une analyse approfondie du développement d'Intertechnique sur le long terme, nous nous appuyons sur son étude et ses conclusions dans cette partie. Au terme de plusieurs achats et transformations, Intertechnique est aujourd'hui le groupe Zodiac-Aerospace.

Intertechnique devient un groupe international présent sur les marchés des avions civils⁴²¹. À partir de 1956, Intertechnique entame une diversification, sur les marchés du nucléaire, de l'instrumentation et de l'informatique, pour prévenir une baisse d'activité dans l'aéronautique⁴²². La branche est soumise, en France, aux aléas des commandes du CEA et Intertechnique choisit alors d'aller conquérir le marché américain. Si la filiale américaine créée en 1967 n'aura qu'une durée de vie limitée, la veille assurée sur les développements américains persuade Intertechnique de la nécessité d'intégrer les nouveaux mini-ordinateurs dans leurs systèmes et d'acquérir la maîtrise technique du mini-ordinateur microprogrammable. Intertechnique peut acheter des ordinateurs américains et elle obtient la licence de fabrication et de vente de Microdata. En cela, Intertechnique suit une trajectoire proche de Hewlett-Packard, qui fonde ses réponses sur l'électronique numérique et l'informatique.

Pour répondre au milieu industriel et aux besoins de l'instrumentation, automatisée et temps réel, Intertechnique commercialise des systèmes informatiques, des mini-ordinateurs et tout particulièrement trois modèles : Varian 620i, Multi-8 et Elbit⁴²³. En un sens, Intertechnique est parmi les premières entreprises françaises à produire un mini-ordinateur⁴²⁴. Le Multi-8 est un clone du Microdata 800, construit sous licence⁴²⁵ en 1969.

Au-delà du mini-ordinateur, la conception des systèmes pour les automatismes et l'instrumentation repose sur deux données techniques : la « logique câblée » et la microprogrammation. En logique câblée, les montages sont réalisés à partir d'un grand nombre de composants (relais, composants discrets et circuits intégrés) et ils sont conçus une fois pour toute. Le schéma est câblé à l'étude, transcrit en circuits électroniques, n'offrant plus aucune souplesse *a posteriori*. Par ailleurs, la durée de l'étude, la spécificité de chaque montage, font que ces réalisations sont coûteuses, en plus d'être encombrantes et difficilement modifiables. La partie matérielle est primordiale, elle est difficile à modifier une fois réalisée en vue d'une fonction donnée.

⁴²¹ Intertechnique participe au développement aéronautique français sur la base d'une stratégie au long cours : assimiler les technologies d'origine américaine (qui sont les leaders du marché) pour ensuite innover à son tour ; et maintenir une satisfaction constante de son premier client, Dassault. (*Ibid.*)

⁴²² « Intertechnique choisit en 1956-1958 les calculateurs numériques pour gérer les organes de sécurité des centrales nucléaires d'E.D.F. et les analyseurs multicanaux, appareils de mesure de l'énergie nucléaire utilisés par les ingénieurs du Commissariat à l'énergie atomique (C.E.A.), comme seconde voie de développement. En premier lieu, ces nouvelles activités présentent de fortes complémentarités techniques et commerciales avec la branche Aéronautique. La société utilise ses compétences dans le câblage pour se lancer dans la fabrication d'analyseurs multicanaux » (*Ibid.*).

⁴²³ Elbit est un miniordinateur produit par Elron Computers, une société israélienne spécialisée et orientée sur les applications de défense. Pour le Varian 620i, voir note 417.

⁴²⁴ Parmi les concurrents français il y a la CAE (Compagnie d'Automatisme et d'Électronique) créée en 1960 par la CSF, avec le soutien d'Intertechnique et de la compagnie américaine Thompson-Ramo-Woolridge. CAE avait lancé la construction de sa machine 10010, puis sous le Plan Calcul la CII (Compagnie Internationale d'Informatique, absorbant la CAE) poursuit cette fabrication sous le nom d'Iris 10. Pour des exemples d'automatismes voir [URL : http://www.feb-patrimoine.com/projet/10010/cii_10010.htm consulté le 16/04/2019].

⁴²⁵ Le Microdata 800 est microprogrammé, modulaire, relativement économique, avec des circuits en technologie TTL (Transistor-Transistor Logic) et une intégration dite « Medium scale ». Le manuel du MicroData 800, daté de juin 1969, est en ligne : [URL : http://bitsavers.trailing-edge.com/pdf/microdata/800/69-3-0800-001_800_Ref_Man_Jun69.pdf consulté le 19/04/2019].

À la faveur de la miniaturisation des circuits, les machines ont bénéficié progressivement de microprogrammation⁴²⁶ : un circuit « micro-machine » est conçu pour réaliser une opération plus complexe « macro-machine ». Il s'agit d'une transposition d'opérations logicielles dans le matériel, pour accélérer le traitement informatique. L'utilisateur ne voit pas les microprogrammes, seulement la « macro-machine » avec un jeu d'instructions étendu, plus de fonctions et plus de souplesse dans la programmation. Les machines Varian, Elbit, Micro-data, et donc le Multi-8, en étaient pourvues.

La mini-informatique, avec sa puissance de calcul, devient fondamentale et la conception des systèmes intègre des ingrédients matériels et logiciels. Le système Plurimat 20 est un bon exemple de « mini-ordinateur scientifique », pour l'acquisition multi-canaux et le traitement de l'information dans les expériences de physique ou de chimie⁴²⁷. Il est commercialisé par Intertechnique en 1973, sur la base du Multi-8. Antérieurement Intertechnique avait conçu le Nudiac, lancé en 1969. C'est un instrument complet d'acquisition de signaux pour l'instrumentation nucléaire, de contrôle et commande d'expériences, et de visualisation sur écrans cathodiques. Il est le produit d'une collaboration entre Intertechnique et des informaticiens et physiciens du CEA, spécialistes de spectrométrie nucléaire⁴²⁸. Derrière ce système se trouvent des développements logiciels considérables pour permettre l'exploitation d'expériences nucléaires avec un grand nombre de données, et pour objectif de le rendre opérationnel pour des physiciens qui ne soient pas informaticiens.

L'autre produit phare de 1973, présenté lors de l'exposition Mesucora, est l'Histomat-S : système d'acquisition et de traitement des signaux, incorporant l'échantillonnage pour la conversion analogique-numérique, des moyens de traitement numérique, et un système de visualisation par oscilloscope. C'est un système générique qui accepte jusqu'à 32 signaux électriques en entrée. L'Histomat échantillonne les signaux pour ensuite réaliser de multiples traitements numériques : lissage des courbes, calcul de corrélation, intégration, calcul de variance et transformée de Fourier sur 4096 points d'acquisition. Les arguments de vente résument les choix de conception : « Sa rapidité d'acquisition est celle d'un système câblé, et sa puissance de calcul celle d'un ordinateur microprogrammé »⁴²⁹.

L'instrumentation produite par Intertechnique se limite à quelques systèmes génériques de ce type, parce que la perspective qui se dessine à la fin des années 1960 est celle des « Systèmes spéciaux ». Un service dédié est mis en place chez Intertechnique et dirigé par André Truong Trong Thi : c'est un département d'électronique appliquée à la médecine nucléaire, scintigraphie numérique et traitement du signal. Il s'agit de concevoir des systèmes « sur mesure » dont la demande grandit au fur et à mesure des possibilités des technologies électroniques. Le maître mot est le « temps réel », c'est-à-dire la capacité du système de contrôle à calculer et prendre des décisions sans ralentir le processus. Mais pour un groupe

⁴²⁶ Les définitions de la microprogrammation varient d'un contexte à l'autre, d'une période à l'autre, nous avons tenté d'en résumer l'esprit.

[URL : http://www.aconit.org/histoire/calcul_mecanique/documents/Histoire_de_la_microprogrammation.pdf consulté le 19/04/2019].

⁴²⁷ Les performances du Plurimat-20 sont analysées en détail par les services du CEA (Blin 1973). Pour des exemples d'utilisations (nombreuses) dans l'instrumentation en physique, voir (Sellier, Guillaume et Weymann 1977).

⁴²⁸ (Beauval et al. 1969; Cern 1969).

⁴²⁹ Il est présenté au Mesucora de 1973, ainsi que dans la revue *Automatique et informatique industrielle*, n° 17-18 juin-juillet 1973.

comme Intertechnique la fourniture de systèmes sur mesure s'avère plus complexe qu'il n'y paraît : c'est le créneau sur lequel va s'installer R2E à partir de 1970.

Au fil des années 1970, Intertechnique se spécialise dans la mini-informatique : après le Multi-8, Intertechnique commercialise en 1972 le Multi-20 avec des circuits électroniques de niveaux d'intégration plus élevé, puis le Multi-4 commercialisé en 1974. Les usages se diversifient dans les automatismes industriels, le contrôle de processus, les centrales nucléaires, et bientôt la gestion : Intertechnique va chercher à répondre à l'informatisation croissante des entreprises, jusqu'aux PME, et à l'ouverture de l'administration à d'autres constructeurs que le « champion national » CII-Honeywell-Bull. Ce faisant, elle s'éloigne de son cœur d'activités et doit affronter une rude concurrence, mondiale. La branche restera déficitaire jusqu'en 1982.

C. Le microprocesseur dans l'instrumentation : l'exemple de la conception du R2E-Micral.

Après le survol général de la décennie et les quelques perspectives esquissées chez les deux fabricants Informatik et Intertechnique, nous allons entrer dans le détail d'une instrumentation et d'un fabricant pour saisir tous les enjeux de l'électronisation des instruments, et les rapports qui se nouent entre électronique, instrument et mathématiques. Nous avons retenu un système très particulier, conçu dans ce milieu de l'électronique industrielle : le Micral de la petite entreprise R2E, Réalisations et Études Électroniques. Le Micral est inventé comme instrument scientifique initialement en 1972, mais il est très connu dans l'histoire de l'informatique parce qu'il est le premier micro-ordinateur à microprocesseur commercialisé en 1973. En tant qu'instrument il est au catalogue de R2E sous le terme « RE50 Data Logger », mais nous conserverons le nom Micral pour désigner ces deux systèmes de conception similaire. Micral est en tout cas important car il incarne et concentre à lui tout seul toutes les facettes du croisement de l'électronique, de l'informatique et de l'instrumentation. Il est emblématique surtout parce qu'il utilise le microprocesseur Intel 8008 très tôt dans cette histoire, ce qui n'avait absolument rien d'évident en 1972. Ce faisant le développement du Micral a été un défi de conception, émaillé de difficultés et de multiples compromis, visant à répondre à un projet scientifique dans le domaine agronomique : il s'agissait d'automatiser un instrument de mesure, récupérer les données de multiples capteurs et faire les calculs de bilans hydriques agronomiques correspondants aux attentes de l'utilisateur, l'INRA.

En 2019, nous avons rédigé un premier article sur la conception de Micral, orienté sur le versant « micro-ordinateur » de son histoire⁴³⁰. Nous consacrons la présente analyse à l'instrument scientifique pour l'agronomie et à sa conception. Pour examiner cette instrumentation, les documents et archives à disposition sont plutôt hétérogènes. Nous avons rassemblé des documents d'origines diverses : les publications du groupe de l'INRA, des manuels techniques des machines Micral, des encarts publicitaires, les archives conservées au Computer History Museum (Mountain view, Californie), plusieurs entretiens⁴³¹ et les très nombreux articles des journaux professionnels déjà cités, auxquels s'additionnent pour l'occasion la revue *01 Informatique*.

⁴³⁰ « Biographie de l'ordinateur R2E-Micral, ou comment faire exister un micro-ordinateur dans les années 1970s » (Petitgirard 2019).

⁴³¹ Nous avons pu interroger plusieurs acteurs, dont des employés de R2E (François Gernelle, Jean-René Tissot, Bernard Francina, Jean-Marie Ackermann) ainsi que Alain Perrier (INRA).

Le processus de conception de l'instrument Micral se caractérise à plusieurs niveaux : le niveau technique, celui du système lui-même, mis en perspective avec le projet scientifique que l'instrument doit servir ; le niveau des concepteurs, avec la biographie des trois personnes centrales impliquées, François Gernelle, André Truong Trong Thi et Alain Perrier ; le niveau de la gestion de l'entreprise R2E créée en 1970, dans le milieu de l'électronique industrielle. Nous débuterons par ce dernier niveau, avec une remise en contexte industriel et économique, permettant de ceindre les trajectoires biographiques qui convergent pour la conception du Micral en 1972.

1. R2E – une petite entreprise de l'électronique industrielle

La société R2E, Réalisations et Études Électroniques, est fondée en SARL par les associés Paul Magneron (1934), André Truong Trong Thi (1936 - 2005) et la société CERME S.A. en 1970. Hébergée initialement par la société CERME, R2E s'installe à Chaville avant de trouver ses premiers locaux à Chatenay-Malabry⁴³² : Micral sera conçu en 1972 au sous-sol de ces locaux qui servent d'atelier de conception et de fabrication.

R2E est une entreprise du secteur de l'électronique industrielle, qui tire ses premières ressources d'Intertechnique. En effet Truong Trong Thi a passé 8 ans comme ingénieur chez Intertechnique, où il dirigeait le service « Systèmes spéciaux ». Gernelle, qui sera au cœur de la conception du Micral, est agent technique, collaborateur du service « Systèmes spéciaux » et il sera secondé chez R2E par d'autres agents venus d'Intertechnique. Magneron est directeur commercial chez Intertechnique. Cette liste n'est pas exhaustive et Intertechnique est un vivier de personnels, de compétences et de savoir-faire : au-delà de l'aspect quantitatif, c'est un creuset culturel, une culture technique qui diffuse vers R2E.

En juin 1973, R2E déménage dans la zone d'activité de Courtaboeuf proche d'Orsay, au sud de Paris : elle s'implante dans ce parc d'activités aux côtés des firmes préalablement installées comme Hewlett-Packard (1968 – centre de R&D), Varian (1968), Tektronix (1969) et Informatik. Ce sont des entreprises américaines et multinationales, déjà positionnées sur le secteur de l'instrumentation et qui ont mis un pied dans la mini-informatique. Intertechnique était installée à Plaisir (Yvelines – 78). Ces quelques éléments montrent à grands traits que le contexte, et le marché de l'emploi, dans le secteur de l'électronique-instrumentation-informatique, reposent sur une circulation des hommes, des compétences et des savoir-faire, très fluide à l'échelle régionale.

L'acronyme R2E indique une volonté de se constituer en une forme de bureau d'études, répondant à des demandes de réalisation de systèmes spéciaux et sur-mesure. L'expérience d'Intertechnique marque les débuts de l'entreprise, mais R2E est animée par beaucoup d'ambitions : investir le créneau des « défis », se faire « artisans de l'électronique », de l'étude à la réalisation de petites séries⁴³³. Truong Trong Thi est à la manœuvre et ce credo initial de R2E est très à son image. Truong Trong Thi est né en 1936 au Vietnam, a fait ses études

⁴³² Dans le département 92, dans la Sud-Ouest de Paris. CERME est une entreprise « cousine » de R2E à ses débuts : elle a été fondée, avant R2E, par Noël Chiarelli, ingénieur chez Intertechnique qui a quitté Intertechnique vers 1969.

⁴³³ Une pleine page de promotion de R2E illustre ces mots d'ordre dans *Automatique et informatique industrielle* de juin 1972.

supérieures en France : il est ingénieur de l'Ecole française de radio-électricité⁴³⁴. Il commence sa carrière en 1959 aux Établissements Lie Belin (devenu Schlumberger) avant d'entrer chez Intertechnique. Il est un spécialiste des instruments de carbotrimétrie, la datation par Carbone 14, et a développé un carbotrimètre à transistors en 1961. Toute son expérience chez Intertechnique est marquée par la conception de systèmes spéciaux. En fondant R2E en 1970 avec le directeur commercial d'Intertechnique, Paul Magneron, c'est en quelque sorte le service « Systèmes spéciaux » qu'il cherche à reconstituer hors d'Intertechnique. Magneron gère une clientèle constituée surtout de scientifiques, du monde de l'instrumentation et en contact avec le CEA installé à Saclay. Gernelle, avec qui il a déjà une expérience de collaboration, est débauché par R2E en 1971. Jean-René Tissot, issu de la même équipe, rejoindra bientôt R2E en qualité d'ingénieur et responsable technique.

L'artisan principal de la conception électronique du Micral est François Gernelle (né en 1944). Sa trajectoire jusqu'à devenir ingénieur en électronique et informatique est marquée par le terrain : la formation autodidacte prime sur la formation scolaire et académique. Il s'intéresse à l'électronique sous différentes formes : électronique militaire à l'occasion de son service militaire, électronique grand public dans la maintenance des téléviseurs, jusqu'à son embauche chez Intertechnique. Gernelle travaille sur des systèmes d'acquisition de données nucléaires et médicales. Il est donc aux prises avec les mini-ordinateurs configurés pour le contrôle des processus temps réel et l'instrumentation.

À titre d'exemple Gernelle a participé au développement d'un système de test de sources au plutonium, pour un des principaux clients de cette branche d'Intertechnique, le CEA. Afin d'alimenter les futurs pacemakers, les sources devaient être testées, pour s'assurer d'un rayonnement limité, sinon néfaste pour le corps humain. L'automate conçu utilise le mini-ordinateur Multi-8 pour piloter l'ensemble des dix postes de mesure (rayonnement gamma, neutrons, calorimétrie...) et faire passer la source d'un poste à l'autre⁴³⁵.

2. R2E et la conception du Micral

Le projet industriel initial de R2E ne portait pas en lui-même l'idée de faire de la micro-informatique : la culture de R2E est celle de la mini-informatique, de par les hommes, les compétences, les trajectoires qui convergent dans R2E. L'entreprise fait du sur mesure et commercialise également des produits électroniques génériques⁴³⁶.

C'est pour Micral, et avec Micral, que le pas va être franchi vers le microprocesseur et la future micro-informatique, qui se trouve être à la fois en continuité et en rupture avec le

⁴³⁴ Aujourd'hui EFREI (Ecole Française d'Electronique et d'Informatique) : c'est une école d'ingénieur privée (habilitée depuis 1957 à délivrer le titre d'ingénieur). On trouve une courte biographie, un peu enflammée, de Truong Trong Thi dans *Les impatients ou la Folie de créer* (Cahier 1980).

⁴³⁵ C'est un système de contrôle perfectionné, nécessitant beaucoup de calculs étant donné la complexité même de chaque poste de mesure, qui n'autorise aucune approximation et doit assurer un fonctionnement en sécurité. Ce qui nécessite un développement électronique et des programmes informatiques robustes pour le Multi-8 qui pilote le système. Entretien avec François Gernelle, le 13 mars 2015. Plusieurs projets, entamés dans les années 1960 aboutiront vers 1973 à la commercialisation des premiers pacemakers à plutonium 238 (thermopile) [URL : <https://www.mdtmag.com/blog/2016/01/medtech-memoirs-plutonium-powered-pacemaker> consulté le 16/04/2019].

⁴³⁶ Par exemple le RE30 (1972) - « Système d'enregistrement de données sur bande magnétique compatible » ; le RE100 (1972) - « Imprimante 21 colonnes » ; le RE35 (1973) - « Enregistreur mini-cassette », utilisé en médecine nucléaire.

monde des mini-ordinateurs. Le basculement de R2E dans la conception d'un système à microprocesseur résulte d'une opportunité : R2E répond à une demande d'un client, l'INRA⁴³⁷, pour un automate de mesures et de calculs pour l'agronomie. Le choix de R2E est d'y répondre par un système générique programmé pour l'application spécifique demandée d'une part, et de profiter de l'opportunité pour commercialiser ce système générique, hors du contrat passé avec l'INRA.

Le contrat est signé entre R2E et l'équipe d'Alain Perrier à l'INRA en juillet 1972. C'est une forme de pari technique et économique de R2E de réaliser une machine plus légère et moins chère que ce qui existe sur le marché, pour répondre au besoin d'automatisation de mesures de l'équipe d'Alain Perrier. Il s'agit de regrouper des compétences chez R2E pour proposer un système sur mesure pour l'INRA, et de rentabiliser en quelque sorte quasiment la même équipe et les mêmes compétences sur un projet de petit ordinateur. De Gernelle à Truong Trong Thi la solution semble faire consensus au sein de R2E.

Ce pari est porté par une claire vision du potentiel du microprocesseur⁴³⁸, en particulier le modèle Intel 8008. C'est la première puce électronique commercialisée dont les spécifications permettent de réaliser un système réellement programmable à volonté : le 8008 a le potentiel pour être un système générique, et programmable pour une application donnée.

De l'autre côté, le risque relatif est accepté par l'INRA, sur la base d'un engagement à collaborer avec R2E. D'une part l'équipe de l'INRA possède une expérience forte en instrumentation bioclimatique, ils maîtrisent la pratique instrumentale, les modèles théoriques et ont une appréciation assez précise du besoin qui est le leur. D'autre part, comme tout expérimentateur et observateur de l'instrumentation au tournant des années 1970, Perrier et son équipe voient que l'électronique évolue très vite, qu'elle se miniaturise surtout, et qu'il existe déjà des « caleulottes » commercialisées. Le pari de miniaturiser un système automatisé de calcul et d'instrumentation est très raisonnable de ce point de vue. À la condition expresse d'une réelle collaboration entre Alain Perrier et l'équipe R2E, attendu qu'il est le seul à connaître tous les calculs et contrôles à opérer dans ses instruments pour remplir le contrat.

3. L'expérience bioclimatique à l'INRA

Sous certains aspects, cette collaboration avec l'INRA a tout de même un côté inattendu. En effet, la culture des agronomes porte plus du côté de la recherche chimique et biologique que du côté des « sciences pour l'ingénieur » dans ses aspects instrumentaux électroniques et informatiques. Il n'y a d'ailleurs pas d'équipement informatique significatif à l'INRA pour les recherches, pas d'expérience avec des moyens informatiques. Le groupe d'Alain Perrier fait figure de grande exception⁴³⁹. Celui-ci a d'ailleurs un parcours atypique : il est ingénieur agronome (1964) et entre comme assistant à l'INRA en 1965 ; il fait une thèse en mécanique des fluides et sur les échanges thermiques (1967). Il est un spécialiste de la physique de l'environnement.

Le cheminement vers R2E n'a rien d'évident *a priori*. Il repose en premier lieu sur un caractère hors norme à l'intérieur même de l'INRA : l'équipe de bioclimatologie associe des

⁴³⁷ Nous n'avons pas de certitude sur ce point, mais il semble que Guy Ragot, ingénieur commercial de R2E, ait détecté ce besoin début 1972, alors qu'il était en contact avec l'INRA pour des imprimantes R2E.

⁴³⁸ Gernelle découvre le « Preliminary Data Sheet » de l'Intel 8008 en 1971 (Gernelle 1998) : le document contient toutes les informations techniques permettant de saisir l'horizon des possibles techniques avec ce microprocesseur.

⁴³⁹ Entretien avec Alain Perrier, le 9 mai 2018.

physiciens, qui sont rares à l'INRA en dehors d'Alain Perrier, portant une recherche instrumentale et une perspective « environnementaliste », c'est-à-dire vers l'analyse de conditions les plus réelles possibles, en plein champ. Leurs recherches les conduisent à mesurer des paramètres multiples, dans une situation expérimentale très complexe. Au cœur de leur recherche, se trouve la question de l'eau dans les cultures : utilisation de l'eau et décisions d'arrosage optimales, reposant sur la mesure de l'évapotranspiration des cultures⁴⁴⁰.

Avant de rechercher une automatisation accrue de leurs instruments, l'équipe a acquis un capital de moyens et de résultats⁴⁴¹. L'équipe réalise des mesures d'évapotranspiration depuis 1967, avec des dispositifs et des instruments sans cesse perfectionnés⁴⁴². La principale méthode employée avant le système développé avec R2E consiste à mesurer, dans un intervalle de temps donné, la variation de poids d'un morceau de végétation, avec toute la zone de sol nécessaire à son alimentation en eau.

L'ambition du programme scientifique de l'équipe de l'INRA en 1972 peut se résumer de cette manière. Ils souhaitent remplacer les pesées par un système dérivé de la méthode du bilan d'énergie, reposant sur d'autres types de mesures : mesures de flux de chaleur, de rayonnements, de gradients de température et de concentration de vapeur d'eau. Le système à développer doit donc gérer des mesures simultanées, collecter des données, calculer les bilans, et imprimer les résultats. L'objectif majeur fixé par Perrier⁴⁴³ était de pouvoir mesurer en plein champ de façon continue : si possible 24h sur 24h, pour une analyse des cycles diurnes ; et 365 jours par an pour faire des bilans saisonniers et suivre le cycle annuel des écosystèmes, cela afin d'établir un réel bilan annuel tant hydrique que de production végétale.

Les modèles théoriques, arrière-plan de la méthode du bilan d'énergie, sont connus depuis plusieurs années, mais l'instrumentation mise en œuvre jusqu'en 1972 se heurte à de trop grandes imprécisions de mesure. En outre, pour les calculs de gradients et les bilans, il faut répéter les mesures à cadence régulière, pour bénéficier d'une bonne précision dans les calculs de moyenne. Acquérir des données en nombre est aussi important que calculer selon les formules élaborées. La préparation instrumentale et l'analyse numérique correcte, en vue de l'automatisation du système sont conséquentes : dans la phase de réalisation avec R2E, le travail d'adaptation aux contraintes imposées par l'électronique sera tout aussi important. Enfin, différence très significative avec les conditions de laboratoire, l'enjeu est de mesurer en plein champ et en conditions météorologiques réelles.

L'équipe a déjà utilisé des moyens informatiques, externes à l'INRA. Comme nombre d'équipes sans moyens informatiques, c'est du côté du CIRCE à Orsay qu'un calculateur

⁴⁴⁰ L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation de l'eau (depuis les sols par exemple) et de la transpiration des plantes d'une surface donnée. C'est une part importante du cycle de l'eau. « La mesure directe de l'évapotranspiration fournit des données précieuses concernant le bilan hydrique et la consommation en eau des diverses sources naturelles, sols nus ou couvertures végétales en particulier. » (Perrier, Archer et Blanco de Pablos 1974). L'enjeu est d'imaginer des méthodes pour mesurer directement ou déterminer indirectement cette évapotranspiration.

⁴⁴¹ (Chartier et Perrier 1971; Perrier, Archer et Blanco de Pablos 1974; Perrier 1975a; Perrier et al. 1975; Perrier 1975b) : ces publications dressent des comptes-rendus des mesures, dispositifs et instruments, montrant les deux photos du système R2E / BEARN reprises en illustration.

⁴⁴² Installés à la Station Bioclimatique de Versailles / INRA : (Perrier, Archer et Blanco de Pablos 1974).

⁴⁴³ Entretien avec Alain Perrier, le 9 mai 2018.

puissant est accessible. Si un mini-ordinateur pouvait satisfaire les besoins de l'équipe, il reste malgré tout hors de portée financière de l'équipe de l'INRA.

À la recherche d'alternatives, et suite à la prospection d'entreprises électroniques susceptibles de répondre à leurs besoins, l'équipe se tourne vers R2E. L'accueil, pour ne pas dire l'enthousiasme, de R2E est un aspect important : pour R2E et ses équipes, le système INRA n'est pas un système classique tel qu'ils sont habitués à élaborer pour le médical et le nucléaire. C'est donc un petit défi à relever. On trouve des deux côtés un goût pour une recherche-développement exploratoire, une convergence de visions concernant une instrumentation en phase générale d'automatisation.

4. La collaboration R2E-INRA : de Micral à BEARN

Le contrat est passé en juillet 1972, et la livraison par R2E est assurée en janvier 1973. De l'intention initiale à la concrétisation, à peine 6 mois se sont écoulés. R2E livre donc un premier système automatisé de collecte de données et de calcul d'évapotranspiration, un système opérationnel, autonome, portable et installable en plein champ, adéquat aux mesures agronomiques de l'équipe de l'INRA. Comme nous l'avons souligné, R2E nourrit un projet à deux objectifs corrélés : les machines sur mesure de l'INRA et le dispositif générique, qui sera baptisé Micral, commercialisé en avril 1973. Mais l'architecture interne est équivalente : faire générique, pour spécialiser ensuite la machine, grâce au développement de logiciels spécifiques. Le défi pour l'instrument agronomique a été relevé au prix d'un certain nombre de compromis, qu'ils soient électroniques, matériels et logiciels du côté de R2E et mathématiques du côté de l'INRA. Par ailleurs cette collaboration entre R2E et l'INRA ne s'arrête pas en 1973, elle s'étale sur plusieurs mois avec un développement instrumental continu. Nous examinons ici les détails de cette collaboration, très mal connue, car l'historiographie du Micral ne considère que le volet « micro-ordinateur ».

Indiquons d'abord que l'aboutissement du projet instrumental en 1975 est le système BEARN, Bilan d'Energie Automatique Régional et Numérique, reposant sur les trois instruments de type Micral livrés par R2E. La mise en service de machines autonomes permet de changer d'échelle : les instruments sont déployés sur un territoire (« Régional ») pour mesurer et calculer les bilans d'énergie de manière numérique et automatisée, sur plusieurs mois d'affilée. BEARN sera récompensé par un prix de l'Académie des sciences en 1978⁴⁴⁴. Chacun des instruments BEARN est construit autour d'un Micral, avec une série de périphériques, dont on mentionnera qu'ils sont aussi des produits R2E. L'entreprise assure donc la conception du système et l'intégration de tous les éléments : enregistreurs, imprimantes, logiciels, cartes pour les 7 canaux de collecte de données, etc. Le tout est visible sur la photo du système tel qu'il est déployé en extérieur, voir Figure 59.

⁴⁴⁴ Le système sera déployé pour plusieurs types de cultures : luzerne, maïs, blé, sur le territoire français, puis testé en Guadeloupe (canne à sucre), en Côte d'Ivoire (ananas). Sur plusieurs années de mesures, ce sont des milliers de données enregistrées qui ont contribué au développement des modèles utilisés en météorologie et qui prennent en compte la participation des végétaux dans les bilans globaux de circulation d'eau et plus généralement d'énergie. La bibliographie des articles publiés sur toutes ces études est hors de proportion pour ce mémoire.

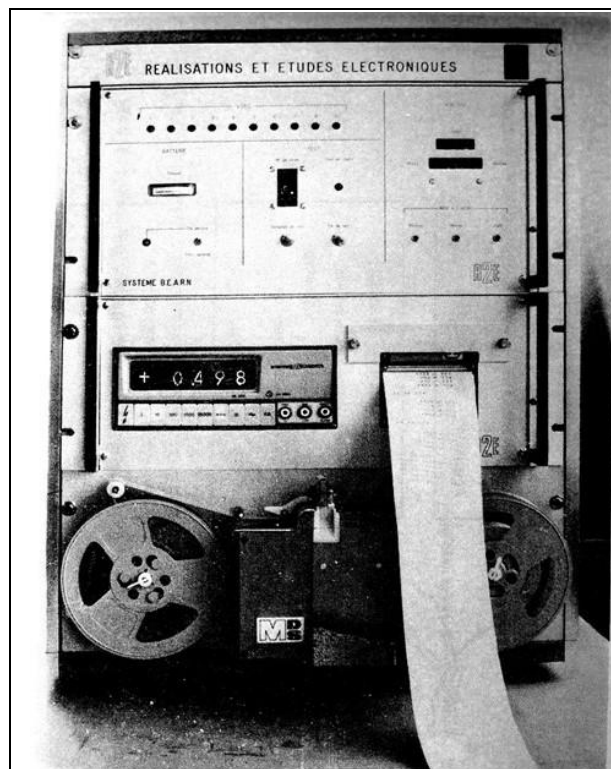


FIG. 2. -- Acquisition de données et unité de gestion et de calcul

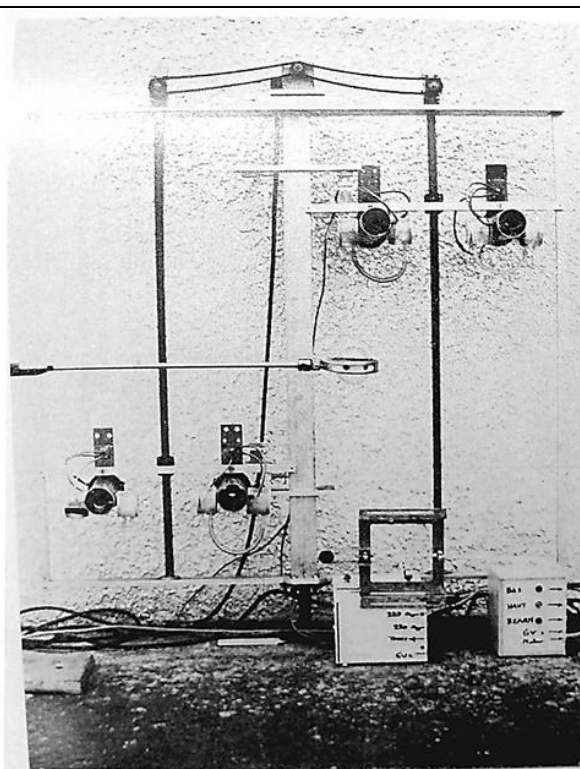


FIG. 3. -- Ensemble des capteurs :

Au premier plan, de gauche à droite : bilanmètre, fluxmètre, boîtier de commande du système inverseur ;
A l'arrière plan : psychromètres montés sur leur châssis inverseur.

Figure 59 - Système BEARN – 1975 (source : (Perrier et al. 1975, p. 25))

La phase suivante de développement des instruments de l'INRA a néanmoins été réalisée avec une autre entreprise, l'Industrielle Française de Mécanique et d'électronique (IFM). Pour étendre l'expérimentation bioclimatique, l'INRA cherche des systèmes non seulement électroniques, mais aussi mécaniques pour des nouveaux systèmes de doubles pesées : ces besoins nouveaux ne sont plus correspondants aux voies choisies par R2E, axées sur les systèmes micro-informatiques.

5. Inventer le Micral – choix techniques et développements logiciels

Du côté de R2E, l'invention et les développements procèdent en deux phases : les six premiers mois sont une effervescence créative dont le pilote est François Gernelle, période pendant laquelle une grande partie des choix techniques matériels sont faits ; une seconde phase démarre dans cette effervescence et se prolonge avec le développement logiciel, mettant aux prises très directement Alain Perrier et l'ingénieur logiciel de R2E, Maurice Benchétrit.

Quels sont les choix de François Gernelle ? Son analyse part du constat que, sur le marché, les systèmes mini-informatiques, qu'il connaît bien, sont susceptibles de répondre techniquement à la problématique de l'INRA, mais ils ont plusieurs défauts : non transportables, chers, ils nécessitent un environnement de fonctionnement contraignant⁴⁴⁵. L'idée de Gernelle, c'est de transposer les multiples cartes électroniques du processeur d'un mini-ordinateur sur une seule carte, avec une puce principale, le microprocesseur Intel 8008. Il faut être électronicien au fait de l'état de l'art pour le comprendre et être éclairé en informatique

⁴⁴⁵ Les mini-ordinateurs consomment beaucoup d'électricité, ils chauffent et il faut refroidir la pièce dans laquelle se trouve l'ordinateur s'il est confiné.

pour saisir les perspectives offertes à ce moment-là. Gernelle a une claire perception que le microprocesseur Intel 8008 est adapté et adaptable, programmable dans de bonnes conditions. Ce que n'offre pas son prédécesseur l'Intel 4004 dont le jeu d'instruction est trop réduit.

Si l'idée force de miniaturiser l'architecture d'un mini-ordinateur en utilisant en son cœur un microprocesseur présente beaucoup d'avantages aux yeux de Gernelle, cela ne suffit pas. C'est tout l'enjeu des 6 mois de conception de 1972 : définir une architecture de machine, faire les choix techniques sur chacun des nombreux composants, inventer tous les dispositifs électroniques nécessaires ainsi que les moyens de programmer la machine de manière moins laborieuse que l'encodage binaire. Gernelle ne veut pas se contenter de construire un système à microprocesseur pour l'INRA, comme il le dira rétrospectivement : « j'ai évité de "bricoler" comme d'autres personnes le faisaient à l'époque avec le 4004 et le 8008 en utilisant simplement les microprocesseurs pour résoudre une fonction »⁴⁴⁶.

Gernelle invente pour l'occasion deux éléments électroniques structurant du Micral : le Pluribus et la Pile-Canal. Le Pluribus constitue une sorte de colonne vertébrale de l'architecture du Micral. C'est un bus dans lequel on enfiche les cartes électroniques en fonction de la destination de la machine à réaliser. Le Pluribus est résolument un choix de conception modulaire⁴⁴⁷. Mais la problématique de fond dans cette conception de l'instrument est la suivante : le microprocesseur a une vitesse d'exécution limitée⁴⁴⁸, et s'il reçoit sans cesse des informations de l'environnement, il sature et n'assure plus sa fonction. La deuxième idée force de Gernelle est de concevoir un système de mémoire-tampon qui déleste le processeur et régule le traitement des informations : c'est le système de Pile-Canal ou encore « Canal pour l'échange d'informations entre un ordinateur et des organes périphériques rapides » d'après l'intitulé du brevet⁴⁴⁹. Chaque carte empile (d'où son nom de Pile) les informations venues d'une entrée, dans une mémoire qui lui est propre ; elle est connectée au Pluribus, fonctionne de manière asynchrone et dépile les informations en temps utile pour le microprocesseur.

À travers la conception du Micral, on saisit toute l'expérience des systèmes temps réel acquise au cours des années Intertechnique, l'importance de la modularité souhaitée, le centrage sur le microprocesseur et les choix architecturaux qui en découlent. Insistons encore, en reprenant une citation de Gernelle, quelques années plus tard⁴⁵⁰ :

C'est vrai, le 8008 était une machine très pauvre, très lente, mais pour moi un micro-ordinateur est avant tout une machine à communiquer, et quand la communication est bien faite, souvent il n'y a pas besoin de beaucoup de traitement.

⁴⁴⁶ Interview de François Gernelle, publiée dans *0/1 Informatique*, n°532, 19 mars 1979.

⁴⁴⁷ Le Pluribus est doté de 11 connecteurs, pour autant de cartes possibles, par exemple : des cartes processeur (et il peut y en avoir plusieurs), les cartes Pile-Canal, des cartes mémoires (ROM, RAM), des cartes pour gérer les entrées/sorties, des contrôleurs pour périphériques.

⁴⁴⁸ Le 8008 fonctionne à une cadence de 500KHz. En termes de calcul, il traite quelques 50 000 instructions par seconde. A titre indicatif, un mini-ordinateur comme le PDP8 en traite 350 000 ; un ordinateur PC du commerce actuel en traite 100 millions par seconde.

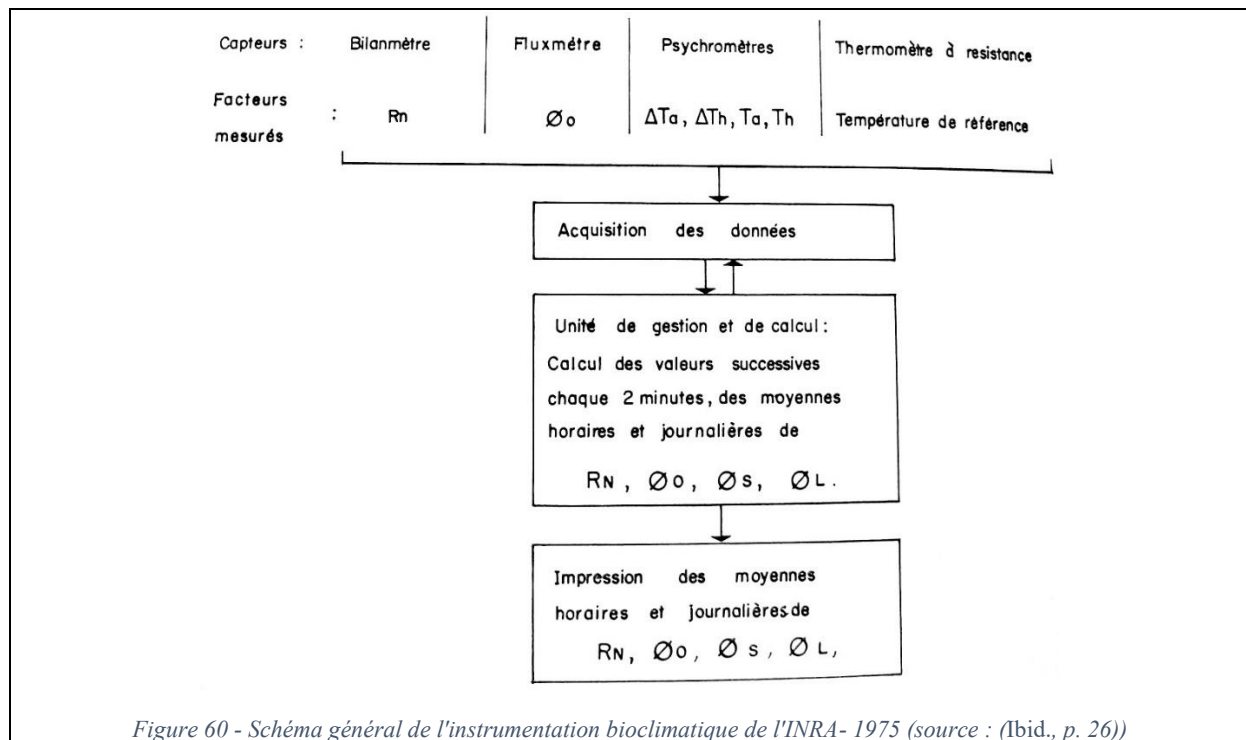
⁴⁴⁹ Voir le brevet déposé en 1973 : Brevet 2.216.884 « Canal pour l'échange d'informations entre un ordinateur et des organes périphériques rapides », inventeur « François Gernelle ». Le brevet stipule : « La présente invention permet d'éviter tous les inconvénients liés à l'accès direct des organes périphériques rapides à certaines zones des mémoires vives d'un ordinateur », mention qui exprimer bien le décalage entre la vitesse des périphériques et le processeur plus lent.

⁴⁵⁰ *0/1 Informatique*, n°532, 19 mars 1979, « Entretien avec François Gernelle ».

Dans la phase d'élaboration avancée de l'instrument pour l'INRA, Alain Perrier collabore principalement avec le responsable logiciel Maurice Benchétrit, car l'enjeu est d'effectuer la programmation du système. Perrier estime d'ailleurs que 80% du développement logiciel des instruments de R2E pour l'INRA a été réalisé par Benchétrit. Les difficultés de ces développements sont nombreuses, à commencer par l'adaptation des modèles théoriques aux possibilités du système électronique. Le modèle mathématique utilisé par Perrier repose directement sur des équations de la thermodynamique et de la physique de l'environnement, dont les équations aux dérivées partielles reliant les différents flux de chaleur aux températures et concentrations en vapeur d'eau. Or le système de contrôle, de mesure et de calcul du Micral est numérique. Tout va reposer sur des mesures prises par des capteurs à des intervalles de temps donnés : la cadence de ces relevés, leur précision, leur mémorisation et leur traitement, chaque étape est un compromis.

L'aspect le plus problématique en termes de calcul est celui des calculs de gradients. Mathématiquement, ces dérivées sont calculées de manière approchée à partir des différences entre deux valeurs collectées successivement : plus la cadence de collecte est élevée, plus les gradients sont précis, mais plus le coût en termes de mémorisation et de calculs est important. Le compromis choisi par Perrier situe la précision des mesures à $1/100^{\text{ème}}$ avec des intervalles de 2 minutes entre mesures. Cela peut paraître très long d'une mesure à l'autre mais c'est suffisant pour déterminer la dynamique d'évolution en conditions de plein champ. Le temps du microprocesseur doit être partagé entre ces calculs, le contrôle global de l'instrument, la gestion des mémoires et des impressions.

L'objectif de l'instrument est de mesurer directement, ou déterminer indirectement par le calcul, plusieurs paramètres : le flux de chaleur dans le sol, le gradient de concentration en vapeur d'eau, le gradient de température ; dans un second modèle s'ajoutera la capacité à mesurer le gradient de CO_2 pour quantifier la photosynthèse. L'acquisition des signaux se fait par 7 canaux, associés à des capteurs différents (voir Figure 60).



Le bilanmètre mesure le rayonnement net R_n , le fluxmètre mesure ϕ_0 la densité de flux de chaleur par conduction à la surface du sol, et les thermomètres indiquent la température locale de référence. Les psychromètres mesurent des écarts de température et de concentration de vapeur d'eau, entre deux altitudes z différentes. Les autres paramètres sont calculés à partir des écarts ΔT et ΔC mesurés : ϕ_s la densité de flux de chaleur sensible dans l'air, ϕ_L la densité de flux de chaleur latente ou évapotranspiration réelle en énergie⁴⁵¹.

$$\Phi_s = \rho c_p K(z) \frac{\partial T_a(z)}{\partial z} \approx \rho c_p K(z) \frac{\Delta T_a(z)}{\Delta z}$$

$$\Phi_L = L \cdot K(z) \frac{\partial C(z)}{\partial z} \approx L \cdot K(z) \frac{\Delta C(z)}{\Delta z}$$

Tout a été programmé et testé avec les systèmes R2E de 1972-73. Ils sont particulièrement rudimentaires pour des systèmes informatiques, ce qui mérite une courte explication. L'Intel 8008 commercialisé en 1972 est en effet une machine presque « nue », Intel ne fournissait aucun assembleur, ni moniteur d'exploitation, ni debugger. Tirer partie de la souplesse autorisée par le microprocesseur, c'est tout autant un choix architectural de Gernelle qu'un défi logiciel qui va incomber à Benchétrit. C'est aussi une des raisons des doutes des industriels de l'informatique installés à l'époque, vis-à-vis du microprocesseur. En effet l'industrie a développé des logiciels toujours plus élaborés pour faire fonctionner les grands ordinateurs et démultiplier leur usage, depuis les années 1950 : l'arrivée sur le marché de processeurs aussi sommaires rappelle à bon nombre d'entre eux une ère « préhistorique » des ordinateurs programmés laborieusement en langage machine. C'est pourtant ce que va faire Benchétrit, et avec lui d'autres pionniers de la micro-informatique, puisqu'il programme l'Intel

⁴⁵¹ Il est très fastidieux de détailler toutes les approximations opérées dans les modèles ainsi que les multiples paramètres $\rho, c_p, L, K(z)$ liés à la thermodynamique du système. Tout est détaillé dans (Perrier et al. 1975).

8008 en langage machine, dès 1972. R2E parvient ensuite à acheter un « cross-assembleur » de la machine Multi-8 d'Intertechnique vers le 8008. Grâce à ce logiciel les programmes sont élaborés sur le Multi-8, avec l'environnement logiciel d'un mini-ordinateur bien connu, pour les reverser ensuite dans le 8008⁴⁵².

La programmation se fait alternativement en binaire directement sur les clés du Micral, ou avec des bandes perforées préparées sur le Multi-8. Les données sur les bandes sont ensuite entrées dans les mémoires du Micral par des lecteurs de bandes ou par l'intermédiaire d'une machine Télétype, la plus courante étant le modèle ASR33. Le travail est très laborieux à tous les niveaux : algorithmique, vérification des procédures, utilisation des bandes pour stocker les programmes, etc. Pour se coordonner, Perrier et Benchetrit définissent le diagramme logique simplifié du système, pour articuler les actions de mesure, de contrôle, de calculs opérés par l'instrument (voir Figure 61).

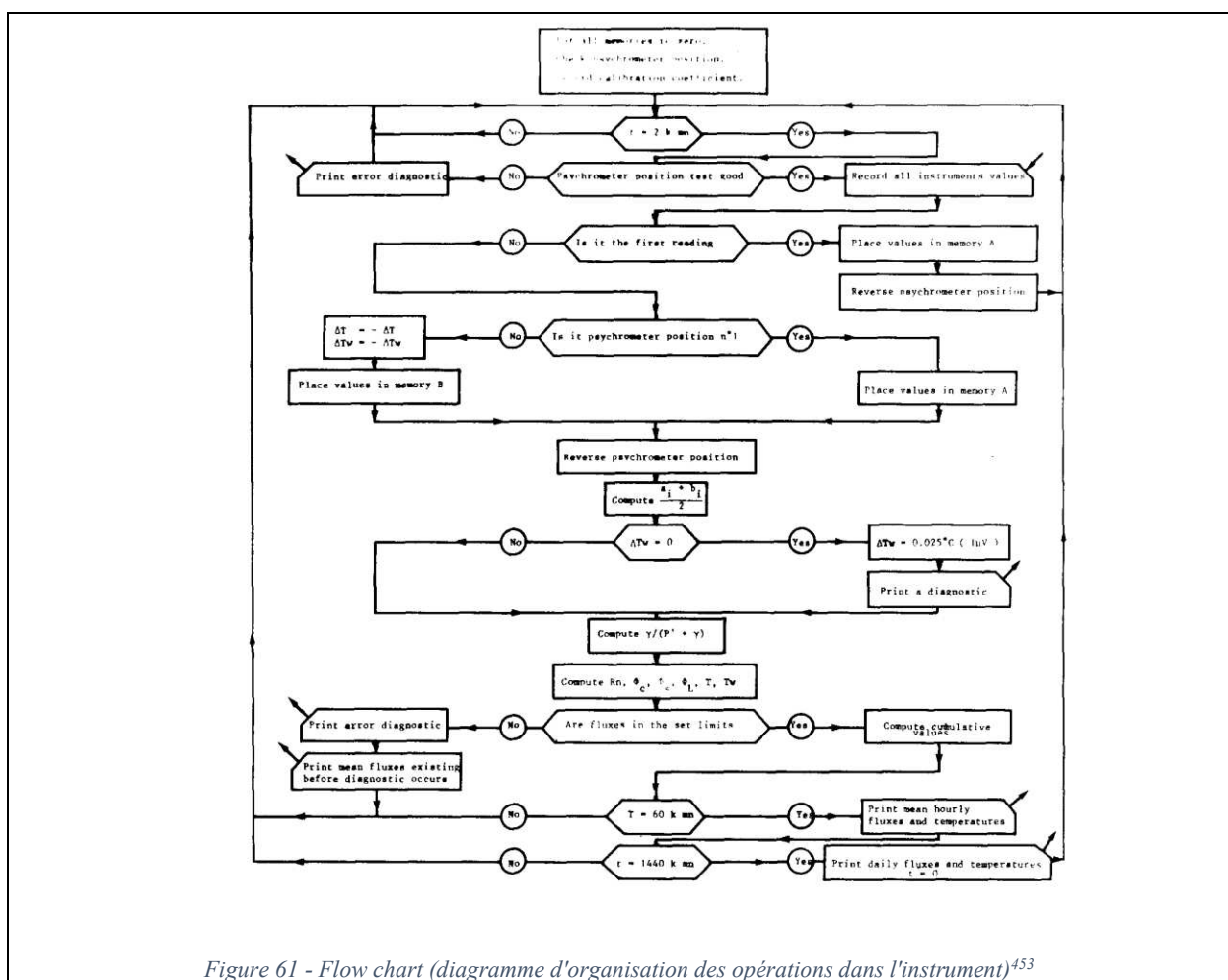


Figure 61 - Flow chart (diagramme d'organisation des opérations dans l'instrument)⁴⁵³

Somme toute, l'instrument réalise toutes les 2 minutes des mesures, des moyennes sur les capteurs, un calcul de bilan énergétique, mémorise et imprime les résultats. Le processus se répète 30 fois par heure, en continu, ce qui est totalement nouveau pour une mesure sur le

⁴⁵² Le portage se fait en inscrivant les codes résultant dans les mémoires du système cible, grâce à une télécrite et des cartes perforées par exemple.

⁴⁵³ Le schéma, de mauvaise qualité, se trouve dans (Perrier et al. 1976).

terrain, en conditions réelles, et inaugure un mode très neuf d'instrumentation en agronomie, en hydrologie et pour toutes les analyses de l'environnement.

6. Micral et les transformations de l'instrumentation

En quelques mois Gernelle, Benchétrit et les équipes de R2E, associés à Alain Perrier et l'équipe de l'INRA, ont réalisé un tour de force :

- structurer une machine générique, avec tout l'arsenal nécessaire pour fonctionner, au point de vue matériel et logiciel, en développant tout ce qui n'existait pas en dehors du microprocesseur Intel 8008 ;
- concevoir un instrument adéquat à l'équipe de l'INRA, en montrant la souplesse de l'utilisation du microprocesseur et en faisant la preuve que le pari technologique était pertinent, malgré un coût de développement logiciel exorbitant ;
- réaliser un système très industrialisé, commercialisable rapidement, et qui fera le succès de R2E par la suite.

Le système réalisé existe en fait sous 3 formes : le BEARN, le Micral et le système RE50. Le système vendu à l'INRA par contrat est en effet commercialisé à partir de 1974 pour lui-même sous l'étiquette RE50 « Data logger » : c'est un système d'acquisition de données, conçu autour du cœur Micral. Il possède toutes les caractéristiques de l'instrument de l'INRA, pour l'acquisition d'informations sur plusieurs canaux⁴⁵⁴. Sa promotion⁴⁵⁵, pour en élargir l'usage, insiste sur l'adaptabilité du RE50 à tous les ensembles scientifiques et industriels, avec des capteurs de température, force, pression, tension, luminosité, etc. S'ajoutent, grâce à la souplesse du microprocesseur, les traitements automatisés, comme la programmation de séquences, la correction de capteurs, la gestion d'alarme, les calculs temps réel.

Gernelle et R2E se sont engagés très rapidement dans l'industrialisation du Micral, devenue leur priorité. Les deux concepts clé du Micral, la structure et la pile-canal sont brevetés dès février 1973, au nom de Gernelle, pour l'entreprise R2E. Le prototype pour l'INRA est intégré dans son boîtier propre, mais le Micral autonome est déjà prévu dans sa propre coque en fonte, avec son système d'alimentation. Le Micral était vendu à un prix très bas pour l'informatique de l'époque : 8 450 francs en 1973. Un mini-ordinateur de qualité comme le DEC PDP-8 en vaut alors 45 000 francs⁴⁵⁶ : il est quatre fois plus cher, beaucoup plus puissant en termes de calcul, mais l'usage est en fait très différent.

L'instrumentation traverse une petite révolution numérique qui va très vite. Elle est accélérée par l'arrivée du microprocesseur. L'analyse de la conception du Micral montre toute la complexité de l'instrumentation aux débuts des années 1970 lorsqu'elle veut s'emparer de

⁴⁵⁴ Le RE50 est une centrale de mesures à 50 canaux, étudiée et réalisée par Bernard Francina, selon les directives et sous le contrôle de F. Gernelle. Cette centrale repose sur l'utilisation d'un multimètre (modèle Fluke) avec une commande fabriquée par Hewlett-Packard : c'est un standard à l'époque dans les pilotages de l'instrumentation électronique. Après les modèles INRA, la première RE50 a été vendue et livrée à la Régie Renault. Entretien avec Bernard Francina, le 24 mai 2018.

⁴⁵⁵ On trouve plusieurs pages publicitaires dans les revues professionnelles, mais il nous est impossible de dire aujourd'hui combien de RE50 ont été vendus.

⁴⁵⁶ Pour se donner des ordres de grandeur : 8450frcs correspondent à plus de 50 000 euros en 2019. C'est aussi le prix d'une voiture luxueuse en 1973. 45 000frcs correspondent à environ 280 000 euros en 2019.

cette nouvelle puce. De très nombreux développements matériels et logiciels sont des corollaires nécessaires pour aboutir à des instruments opérationnels. R2E-Micral a été un maillon de cette transformation, entre 1971 et 1974. Dans les instruments scientifiques, les réalisations R2E prennent aussi bien la forme du sur-mesure comme avec l'INRA, que de l'automatisation intégrée dans des instruments de la Big science que sont les cyclotrons. Dans les transformations du Synchrocyclotron de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay en 1974-75, l'automate Micral est ainsi connecté à l'ordinateur principal IBM 1130. Il doit servir à contrôler les séquences de mesure, piloter les centrales de mesure avec précision⁴⁵⁷.

Malgré tout R2E s'écarte progressivement de l'instrumentation. R2E poursuit un temps sa trajectoire dans le monde des automatismes, avant de basculer dans le celui de l'informatique industrielle et la gestion, une fois les développements logiciels assurés : le micro-ordinateur prend sa place, sous deux formes, aussi bien comme « micro-ordinateur industriel » que comme « micro-ordinateur de gestion ». Cette décision stratégique n'est pas sans rappeler les revirements d'Informatek et d'Inter technique, qui cèdent aux sirènes de l'informatisation des entreprises, secteur très porteur des années 1970.

D. Claude Morillon : du Laboratoire Aimé Cotton à l'instrumentation numérique au Cnam

La lecture transversale des revues professionnelles et l'analyse plus circonscrite de la conception du Micral donnent à voir une partie de l'histoire technologique de l'instrumentation au fil des années 1970, indiquant l'étendue des transformations en cours, l'importance du microprocesseur et toute la complexité que représente le changement de paradigme de conception des instruments, de l'analogique vers le numérique. En un sens il s'agit d'un aspect particulier d'un changement très global de paradigme avec les technologies numériques, accéléré par le développement du microprocesseur et la dissémination de la micro-informatique en France, comme partout ailleurs dans le monde.

Mais, passé le temps des cheminements partiellement communs, les voies du développement de l'instrumentation numérique sont différentes de celles de la micro-informatique. Pour donner une autre facette de ces transformations au tournant de 1980, nous emploierons ici le levier de la biographie scientifique, celle du physicien Claude Morillon (1937-2017), professeur titulaire de la chaire d'Instrumentation scientifique au Cnam à partir de 1982. Au-delà de sa trajectoire individuelle, caractérisée par une expertise de l'instrumentation sur la période 1964-1990, cette élucidation biographique implique un recentrage sur le Cnam comme institution de formation technique supérieure, et permet de suivre l'institutionnalisation du sujet et sa concrétisation en termes de formation des techniciens, ingénieurs et chercheurs dans le domaine.

1. Créer une chaire d'Instrumentation numérique au Cnam

Le sujet de l'instrumentation numérique est discuté dans l'enceinte du Cnam à l'occasion du départ en retraite d'André Fournier (1914-2005) en 1981 et du renouvellement de sa chaire intitulée : Physique générale dans ses rapports avec l'industrie. Le Conseil de

⁴⁵⁷ Voir le compte-rendu dans la conférence de 1975 (Joho 1975) et le rapport des activités de l'IPN sur les Synchrocyclotrons disponible sur le site :
[URL : http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/07/279/7279540.pdf consulté le 17/04/2019].

perfectionnement et le Conseil d'administration du Cnam sont les instances de redéfinition des contours de cet enseignement et constituent une caisse de résonance des enjeux liés aux transformations industrielles en cours à l'échelle de la France. Dans cette institution hybride entre monde industriel, formation professionnelle et recherche académique, les débats vont rapidement tendre vers une problématique reliant trois thématiques : l'instrumentation dite « moderne », l'automatisation des processus industriels et la robotique⁴⁵⁸. Les deux dernières sont perçues comme subordonnées à la capacité de réaliser une instrumentation, à base de capteurs et d'électronique numérique. Tout fait écho aux mouvements que nous avons identifiés précédemment pour les années 1970. L'enjeu en 1981 est à la fois technologique, économique et industriel.

Le cœur de la future chaire se dessine très rapidement, ce sera la conception de l'instrumentation numérique. Le sujet n'est abordé comme tel, apparemment, dans aucun autre cursus universitaire en France à ce moment-là. Cette nouvelle chaire est jumelée à une chaire ouverte l'année précédente au Cnam, en 1980, sur les méthodes physico-chimiques d'analyse, plutôt portée sur le sujet des capteurs. L'ensemble trouve une inscription dans l'Institut National de Métrologie (INM) qui porte une recherche instrumentale en parallèle de ses fonctions de recherche en métrologie scientifique fondamentale.

En outre, une convergence se dessine à l'intérieur du Cnam, sur la définition du périmètre et des ambitions de la chaire, entre les professeurs d'électronique, d'informatique, de physique et d'économie. Le groupe de physiciens, constitué des professeurs André Allisy, Alain Fournier et Albert Septier, est d'ailleurs le vivier des auteurs des différents rapports préliminaires à la définition du périmètre de la chaire. Ils trouvent en Jacques Lesourne, professeur d'économie industrielle, un allié et un des plus influents défenseurs du projet, comme il l'est dans les multiples rapports qu'il rédige dans la même période sur les incitations en faveur des technologies informatiques et électroniques dans l'économie française⁴⁵⁹.

Les candidatures sont ouvertes en novembre 1981, mais peu de candidats se présenteront à la chaire, étant donné l'ampleur du projet d'une part, et les incertitudes sur les conditions d'exercice dans l'établissement, d'autre part, qui n'est pas toujours bien identifié par le monde académique. Les deux candidats au coude à coude jusqu'au bout du processus de recrutement sont Guy Blaise et Claude Morillon. Ils ont de nombreux points communs : ce sont des physiciens expérimentateurs, qui sont entrés dans le domaine dans les années 1960 et qui ont accompagné et participé aux transformations de l'instrumentation scientifique jusqu'en 1980. Ils sont par ailleurs issus de laboratoires du plus haut niveau scientifique sur le sujet en France : Guy Blaise travaille à l'ONERA, Claude Morillon au Laboratoire Aimé Cotton. L'ONERA est un laboratoire dépendant du Ministère de la Défense, dédié aux recherches aéronautiques et aérospatiales : c'est aussi un lieu privilégié du développement des calculateurs analogiques dans les années 1950 en France et un des plus grands utilisateurs de simulation numérique dans les

⁴⁵⁸ Ce sont les termes que nous transcrivons des procès-verbaux : [Archives du Cnam, Fond de l'Administrateur général [17] 34.02.11/D1.2 (Instrumentation) – Rapport de la commission d'examen de la chaire de Physique générale, 6 janvier 1981 ; Rapport au Conseil de perfectionnement sur la situation de la chaire, 11 mai 1981].

⁴⁵⁹ Jacques Lesourne est l'auteur du best-seller *Mille sentiers de l'avenir* en 1980. A cette époque il a analysé les actions en faveur des technologies numériques dans deux contextes économiques : la Silicon Valley et les actions du Ministère de l'industrie (MITI) au Japon.

années 1970⁴⁶⁰. Blaise travaille plus spécifiquement sur les instruments pour la caractérisation des matériaux et les microscopes électroniques⁴⁶¹.

2. Claude Morillon au Laboratoire Aimé Cotton

En 1981, Morillon est maître assistant à l'Université Paris XI-Orsay et chercheur au Laboratoire Aimé Cotton (LAC) depuis 1964. En 1978 il a été nommé sous-directeur du LAC, alors que Pierre Jacquinot cède la place de directeur à Serge Feneuille. Ses recherches sont de nature essentiellement instrumentale et expérimentale, et sont très liées à l'évolution du laboratoire. Il a participé à toute l'évolution de la spectroscopie, depuis les spectromètres tels que le SISAM jusqu'à la spectrométrie FTIR. Il s'inscrit dans les pas de Pierre Jacquinot et des époux Connes. Morillon travaille sur le perfectionnement des spectromètres et le développement de nouvelles méthodes de spectroscopie, maniant l'optique, les lasers, développant des systèmes numériques à base de microprocesseurs et micro-ordinateurs, pour l'acquisition et le traitement des signaux. Du point de vue expérimental ces instruments sont utilisés pour les recherches en physique atomique et constituent le cœur de sa thèse de doctorat d'Etat en 1975 : « Étude expérimentale à haute résolution dans l'infrarouge et interprétation théorique des spectres atomiques du sélénium, du brome, du tellure et de l'iode ».

Morillon a également une expérience au chevet du monde industriel en rapport avec la spectroscopie réalisée au LAC, en particulier avec le CEA et l'ONERA. Son implication dans la formation et dans le DEA d'Optique de l'Université d'Orsay dans les années 1970 lui permettent de tisser des relations avec les industriels comme Thomson, la Compagnie Générale d'Electricité, Jobin Yvon ou encore Quantel.

La continuité entre ces travaux au LAC, et tout particulièrement en spectroscopie FTIR, et l'acte de candidature sur la chaire d'Instrumentation numérique est très claire dans son exposé à la commission d'examen des candidatures en 1982. Il présente les principes de cette spectroscopie, qui devait être encore énigmatique pour de nombreux chercheurs, mettant l'accent sur le processus de traitement de l'interférogramme et la manière dont est conçu un spectroscope FTIR. Morillon explique :

En ce qui concerne l'échantillonnage de l'interférogramme, il est obtenu directement grâce au fonctionnement de l'interféromètre qui a été conçu en fonction du traitement numérique ultérieur du signal. Ce point est d'une importance capitale : à l'ère de l'ordinateur et du microprocesseur, l'instrument scientifique doit être conçu dès l'abord, en tenant compte des possibilités de traitement numérique du signal et de contrôle automatique par commande numérique.⁴⁶²

En 1982 la chaire, rebaptisée entre temps « instrumentation scientifique », est attribuée à Claude Morillon, qui orchestrera pendant 14 ans le développement du domaine au Cnam, dans son volet formation et recherche. Le point capital mentionné dans son exposé sera effectivement structurant de tout son enseignement au Cnam à partir de là.

⁴⁶⁰ (Pierre Mounier-Kuhn 2010, p. 120-129).

⁴⁶¹ [Archives du Cnam, PV du Conseil de perfectionnement du 19 janvier 1982 ; PV du Conseil d'administration du 16 mars 1982].

⁴⁶² [Archives du Cnam, PV du Conseil d'administration du 16 mars 1982 – Notice sur les travaux de C. Morillon].

3. Claude Morillon au Cnam – Les enseignements d'instrumentation scientifique

L'enseignement se construit en trois niveaux, du niveau A au C, pour des publics et dans des objectifs pédagogiques différents. Le niveau A est destiné à un public très large d'élèves, dans un objectif d'acculturation aux technologies modernes d'instrumentation. Pour un public qui est encore familier des technologies analogiques, le cours est une introduction aux technologies digitales et dresse un panorama des avancées du traitement numérique par microprocesseur. Morillon résume l'intention de fond de ce cours : « On s'efforcera de présenter cette question dans le but de rendre possible le dialogue de l'instrumentaliste avec l'informaticien et l'électronicien »⁴⁶³. Le niveau A étant inscrit dans les cursus généraux mêlant la physique générale, les sciences pour l'ingénieur à l'instrumentation, plusieurs centaines d'élèves du Cnam le suivent chaque année.

Le niveau B, véritable cœur de l'enseignement d'instrumentation de Morillon au Cnam, est réservé à des spécialistes, ou futurs spécialistes, concepteurs d'instruments, ingénieurs ou chercheurs. Il est délivré à une centaine d'élèves par an, en moyenne, sur la décennie 1980. Les contenus de ces enseignements sont de deux ordres, technologiques et contextuels. Ce sont des cours destinés à former des techniciens et ingénieurs qui répondent à leurs interrogations : qu'est-ce qu'un microprocesseur ? Comment concevoir un instrument numérique de A à Z ? Ils indiquent le cadre technologique et conceptuel dans lequel inscrire le développement d'une instrumentation. Ces cours sont contextuels au sens où Morillon s'attache à définir les limites de ces instrumentations, les situations où le numérique est pertinent relativement à l'analogique, mais aussi les impossibilités liées à ces technologies. Rappelons que Morillon est un spectroscopiste, c'est son domaine de recherche de prédilection. Mais son enseignement ne se limite pas à ce domaine, au contraire, il concerne l'ensemble de l'instrumentation numérique. Les cours de la chaire sont transversaux et génériques, ce qui a nécessité une très forte réorientation de son activité depuis les projets expérimentaux menés au LAC vers l'INM au Cnam. Étant donné le périmètre étendu de ces cours, le niveau B associe de multiples compétences au Cnam : celles de l'INM, et celles des enseignants des départements de Physique-Métrologie, Mathématiques-Informatique et Électronique-Électrotechnique-Automatisme.

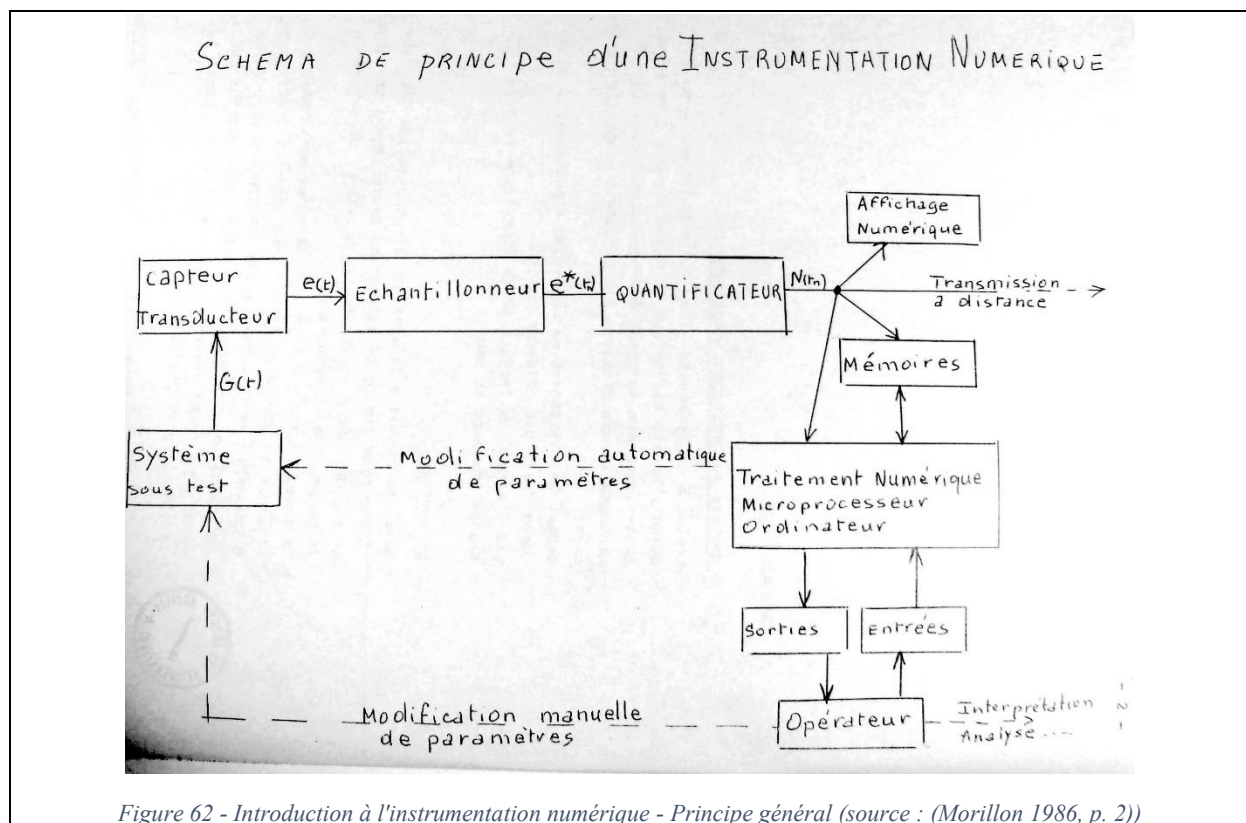
Enfin le niveau C constitue une forme d'extension et d'approfondissement, plutôt réservé à des futurs ingénieurs et chercheurs de la R&D en instrumentation. Cet enseignement est très parallèle à l'autre cours de niveau C, qui fait référence dans toute la métrologie à ce moment-là, celui d'André Allisy professeur de la chaire de Métrologie⁴⁶⁴.

Les enseignements prennent d'autres formes, comme les stages de formation continue, mis en place dès 1982, sur l'intitulé « Instrumentation numérique à base de microprocesseur ». Ces formations à public restreint de 20 spécialistes annuellement, se font au plus près de l'industrie et des laboratoires de recherche.

⁴⁶³ Cette intention figurait déjà dans le projet de programme présenté en 1982 pour sa candidature. [Archives du Cnam, PV du Conseil de perfectionnement du 19 janvier 1982].

⁴⁶⁴ Le duo de cours sur l'« Expression des incertitudes de mesure » et « Signal et bruit » constitue le *vade-mecum* du niveau C. Pour plus détails sur l'enseignement de la métrologie et ses évolutions nous renvoyons à (Lecollinet 2015).

Aussi bien en formation courante au Cnam, qu'en formation continue professionnelle, le cursus de niveau B, avec les cours magistraux B1 et B2, et les travaux pratiques associés, est le plus structurant. Pour former un spécialiste de l'instrumentation numérique dans la décennie 1980 le *curriculum* doit être très large. Le syllabus du cours B1, en 4 fascicules⁴⁶⁵, indique les exigences théoriques et mathématiques d'une part, les contours technologiques d'autre part. Il commence par l'anatomie générale d'un instrument numérique (Figure 62) permettant d'emblée de situer les multiples impératifs de la conception, très éloignée de celle d'un instrument analogique.



En guise d'introduction, Morillon dresse le tableau des avantages et inconvénients des méthodes numériques. Rapidité de la mesure, possibilité de mémorisation et la possibilité d'un « traitement mathématique *a posteriori*, ou en temps réel, par un ordinateur » sont les principaux avantages à tirer. Le premier inconvénient vient des défauts de lecture de résultat car la visualisation d'une aiguille ou d'un enregistreur analogique est plus adéquate dans certaines mesures. Surtout Morillon alerte : « la mesure numérique nécessite diverses opérations qui limitent la précision du résultat obtenu ; l'affichage d'un nombre ne doit pas laisser croire à une parfaite exactitude et que tous les chiffres sont significatifs ; comme pour toute mesure, il nous faudra déterminer le domaine d'incertitude »⁴⁶⁶. En d'autres termes, le résultat de la mesure avec un instrument numérique est pétri d'opérations mathématiques qui

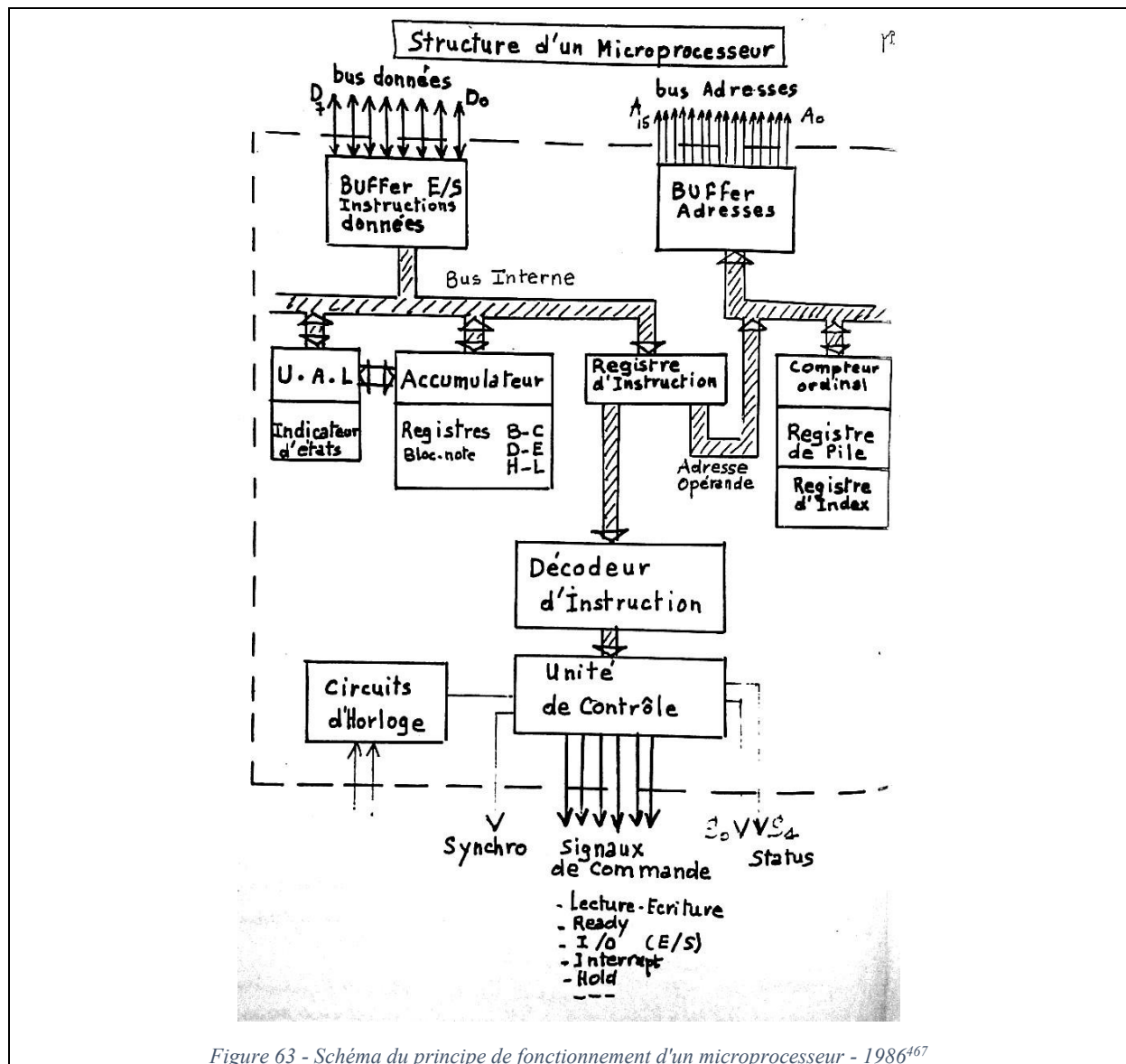
⁴⁶⁵ Tous les cours ont été édités à partir de 1986 par la bibliothèque du Cnam : (Morillon 1986; Morillon 1987; Morillon 1996). Pour la période 1982-86 on trouve quelques plans de cours supplémentaires dans les archives du Cnam : [Archives du Cnam, Fond CDHT-5.06 et Fond AG [268] 34.02.11/B46.3 - Correspondance de C. Morillon].

⁴⁶⁶ (Morillon 1986, p. 1).

échappent à l'utilisateur, mais que le concepteur se doit de pleinement maîtriser : c'est en quelque sorte l'objectif du cours B.

Le cœur du cours est ensuite le cadre théorique dans lequel le concepteur doit s'inscrire : on retrouve tout ce qui a été stabilisé depuis les années 1960, à savoir la théorie des distributions, la notion de convolution et la transformée de Fourier, associées à la notion de spectre et de fonction de transfert d'un instrument. Cet ensemble de savoirs mathématiques est ici très condensé et mis au service de la conception instrumentale.

Au fil des cours B1 et B2, l'élève est confronté au sujet très important des capteurs et de la conversion analogique-numérique. Le cours B2 intitulé « Variable aléatoire, processus stochastique » donne tous les rudiments de la théorie mathématique de l'information, des filtrages numériques et du traitement numérique du signal, avec pour point central les théorèmes de Shannon qui cadrent les théories de l'échantillonnage. Sur le volet plus technologique, Morillon aborde la description détaillée du fonctionnement d'un microprocesseur, l'utilisation ou la création d'un logiciel dédié, les technologies de contrôle et d'automatisation.



Ces deux aspects signent les évolutions considérables de la décennie 1970. Le cours semble loin du temps des pionniers de l'instrumentation à microprocesseur, comme François Gernelle chez R2E, où il fallait fouiller dans les spécifications de chaque modèle de puces électroniques pour se donner une idée de son potentiel et espérer la programmer laborieusement.

Le cours de Morillon indique clairement un mode de conception très structuré, organisé par un modèle d'instrument numérique qui peut se résumer en trois termes : capteur – conversion analogique/numérique – traitement numérique par microprocesseur. Leur réalisation est systématisée mais elle laisse place à de nombreux compromis : dans le rapport signal sur bruit, dans les niveaux d'erreur introduits par la numérisation des signaux, résultat de plusieurs opérations d'échantillonnage et de quantification. Les savoirs mathématiques sont présents à plusieurs niveaux : dans l'*a priori* de la conception, pour modéliser l'instrument, évaluer les performances et accompagner le concepteur pour les meilleurs compromis ; *a posteriori*, dans l'instrument lui-même, comme moteur des algorithmes de traitements numériques, effectués par les artefacts électroniques. Morillon ajoute tous les détails nécessaires sur des microprocesseurs très nombreux, avec leur mode de programmation. Cette partie du cours est un peu détonante dans un paysage où très peu d'ouvrages, en France au moins jusqu'en 1982, sont consacrés au microprocesseur et ses utilisations, même en micro-informatique⁴⁶⁸.

En résumé nous voyons dans la création de ce nouvel enseignement par Morillon un effort de structuration de l'ingénierie de l'instrumentation pour lequel convergent des savoirs mathématiques élaborés depuis plusieurs décennies, un nouveau champ du traitement numérique du signal qui semble acquérir une autonomie, et toute l'électronique du microprocesseur et du micro-ordinateur. Le cours cristallise plusieurs années de recherches sur les concepts et les technologies instrumentales, dont Morillon est un spécialiste depuis 1964 avec son activité au LAC. Il nous semble à vrai dire que le cours exprime toute la culture expérimentale non seulement de ce physicien, mais de l'ensemble des physiciens impliqués dans ces transformations : ils sont immergés dans une culture matérielle de l'expérimentation scientifique, ouverte sur les technologies électroniques et informatiques, et favorable au changement de paradigme très général proposé par le numérique.

En étant inscrit dans l'établissement Cnam, ce cours est également un moyen de cristallisation d'un mode de conception des instruments et un moyen de dissémination des concepts et des pratiques qui sont liés. En permettant l'institutionnalisation du sujet, ces efforts fixent en quelque sorte un standard dans la conception, les manières de traiter les signaux numériques dans un instrument, et, pour partie, les traitements mathématiques réalisables dans l'instrument. Le positionnement du Cnam, entre le monde scientifique et le monde industriel, donne une portée singulière à cette dynamique qui dépasse largement les portes des laboratoires de physique dont Morillon est issu.

E. Perspectives sur les transformations électroniques de l'instrumentation

Les trois perspectives que nous avons adoptées successivement donnent à voir les transformations électroniques de l'instrumentation sur une période récente, indiquant une

⁴⁶⁸ Le plus cité et diffusé est l'ouvrage d'Henri Lilen, *Du microprocesseur au micro-ordinateur: introduction à la micro-informatique* (Lilen 1975). Entre 1975 et 1982 nous avons recensé seulement 5 ouvrages en français détaillant l'architecture de circuits LSI et microprocesseurs : ils sont tous orientés sur l'architecture de micro-ordinateurs.

modalité de la standardisation de la conception et l'institutionnalisation des modes de conception, dans le contexte français. Ce ne sont que des amorces d'une analyse à poursuivre dans des ramifications nombreuses.

Premièrement, le chemin engagé avec la biographie scientifique de Claude Morillon mérite d'être prolongé. Il se trouve que Claude Morillon, décédé récemment, a conservé à son domicile des archives personnelles et scientifiques, inédites pour l'analyse historique et épistémologique. Elles sont une matière première historique à inventorier et exploiter, au bénéfice de l'analyse du processus d'électronisation de l'instrumentation, entre le Laboratoire Aimé Cotton et le Cnam. Nous ne l'avons pas souligné jusqu'ici mais les connexions entre ces deux institutions ont elles-mêmes une histoire plus large. L'INM du Cnam développe en effet des recherches métrologiques sur les longueurs à base d'interférométrie et de spectroscopie : outre Morillon, deux autres chercheurs ont été formés au LAC et recrutés par la suite à l'INM dans ce domaine, Patrick Juncar et Patrick Bouchareine, l'auteur de l'article dans *Techniques de l'ingénieur* en 1977. Bouchareine, opticien et instrumentaliste formé au LAC en 1966, est chercheur à l'INM de 1970 à 1988. André Allisy le professeur de métrologie du Cnam, fondateur et directeur de l'INM, nous avait indiqué avoir sciemment cherché à recruter au LAC qu'il considérait être un laboratoire de référence en France sur la spectroscopie⁴⁶⁹. L'INM se nourrit en partie d'une culture de physique expérimentale du LAC. La trajectoire de Morillon, si elle est spécifiquement orientée sur l'instrumentation numérique, n'est pas isolée.

Nos recherches récentes sur l'histoire du Cnam des années 1970 nous ont montré par ailleurs que le sujet des technologies « micro », englobant microprocesseur, micro-ordinateur et micro-informatique, émerge au Cnam par plusieurs canaux. Chronologiquement, Bruno Lussato, professeur du Cnam sur la chaire d'Organisation du travail et de l'entreprise, est le premier et le plus ardent défenseur de la micro-informatique en perspective des sciences de l'organisation. Il est l'auteur en 1974 de l'ouvrage *La micro-informatique : introduction aux systèmes répartis*, avec Jean-Pierre Bouhot et Bruno France-Lanord. Par ailleurs, les travaux de l'équipe « Système », berceau du futur laboratoire d'informatique du Cnam, sont fortement orientés par les technologies de la mini-informatique, mais quelques ingénieurs explorent l'utilisation des microprocesseurs dans les techniques informatiques⁴⁷⁰. Tout ceci interroge sur la convergence d'intérêts qui se manifeste entre départements du Cnam autour de la création de la chaire d'Instrumentation numérique : il transparaît une sorte de projet global, partagé par ces différents acteurs, qui porte des perspectives de transformation de l'ensemble du système productif par les technologies micro. Seule une analyse socio-historique de l'institution, remise dans le contexte des transformations socio-économiques du tournant des années 1980 peut apporter des éléments de réponse. Pour l'heure, le Cnam de cette fin des Trente Glorieuses est encore mal connu dans ses évolutions tant sur le plan des enseignements que des projets scientifiques qui s'y déploient. L'analyse par biographies des professeurs, qui demande encore à être aboutie, servira à préciser cette inscription institutionnelle des transformations numériques au-delà même de la question de l'instrumentation.

Deuxièmement, nous avons choisi pragmatiquement de circonscrire nos analyses à l'échelle de la France. Mais les origines de la conception et de la fabrication des

⁴⁶⁹ Entretien avec André Allisy, le 12 décembre 2012.

⁴⁷⁰ Nous renvoyons au dossier consacré à ce sujet dans les *Cahiers d'histoire du Cnam* : (Paloque-Berges et Petitgirard 2017).

microprocesseurs, qui se trouvent en Californie dans la Silicon Valley, obligent *a minima* à mettre en comparaison la dynamique nationale avec les évolutions américaines. L'historiographie est importante sur les évolutions de la Silicon Valley, d'un point de vue technologique, culturel ou financier⁴⁷¹ mais malheureusement assez maigre sur le sujet plus précis de l'instrumentation scientifique et industrielle. À notre connaissance, l'historien Cyrus M. Mody est un des rares à avoir abordé le sujet⁴⁷². Il fait état des expériences pédagogiques à l'University of California Santa Barbara (UCSB) avec la création du « Master of Scientific Instrumentation » (MSI) en 1971, qui va prendre très tôt le virage de la microélectronique et des microprocesseurs⁴⁷³. Le programme de formation sur deux ans mise sur la pratique instrumentale et souhaite faire de ses étudiants des : « active participants in the revolution [that is] microelectronics ». Mais le programme ne néglige pas les ressorts conceptuels de l'instrumentation, flanquée de cette même microélectronique⁴⁷⁴.

Dix ans avant la chaire d'Instrumentation numérique au Cnam, le programme MSI, que Morillon et les physiciens du Cnam ignoraient très probablement, a des ambitions légèrement différentes mais beaucoup de points communs avec le programme du Cnam. Il traduit une même culture de la physique expérimentale prompte à s'approprier très tôt les technologies électroniques et informatiques. Sans procéder à une exploration systématique des revues américaines, il est assez facile de saisir que ce programme MSI est un reflet des transformations de l'instrumentation équivalentes à celles dont nous avons fait état en France. Dans la revue *Electronics news*, les termes choisis par Bruce Le Boss en 1975 nous paraissent tout à fait appropriés pour les caractériser : « Microprocessors spark a quiet revolution in instrumentation »⁴⁷⁵.

« Quiet revolution », révolution tranquille, révolution silencieuse, l'expression désigne les transformations très rapides de l'instrumentation, mais inscrites dans une certaine continuité de l'histoire de la microélectronique. L'introduction du microprocesseur dans l'instrumentation n'est pas fracassante, mais elle bouleverse le paysage. Révolution silencieuse qui, à notre sens, caractérise très bien les effets de la miniaturisation rapide des artefacts électroniques : ils sont de moins en moins visibles et les fabricants font tous les efforts pour en masquer les complexités au prix d'une interface logicielle toujours plus importante. Révolution silencieuse, pourrait-on dire aussi, parce que les mathématiques et les algorithmes implantés dans les instruments sont aussi discrets qu'omniprésents. Révolution tranquille, révolution silencieuse, enfin, si on la rapporte à la fanfare technico-médiatico-politique qui va accompagner le développement de la micro-informatique, à base de microprocesseurs, très amplifiée par la commercialisation de l'IBM PC en 1981.

Inutile ici de faire la liste, trop longue, des acteurs, laboratoires et institutions, en Europe et aux États-Unis, qu'il faudrait intégrer dans les recherches pour asseoir nos analyses socio-historiques sur cette période charnière pour l'instrumentation. En revanche il n'a pas été suffisamment mentionné que les fabricants d'instruments doivent redevenir sujet de premier

⁴⁷¹ Du désormais classique (Lécuyer 2006) aux aspects contre-culturels abordés dans (Turner 2006).

⁴⁷² Dans l'article « Santa Barbara Physicists in the Vietnam Era » (Mody 2016), qu'il faut mettre en regard de ses analyses sur les communautés instrumentales (Mody 2011).

⁴⁷³ Le programme MSI est à l'initiative de Vincent Jaccarino et Virgil Elings, dans le département de Physique de l'UCSB, rejoints par David Nicoli et Paul Barrett.

⁴⁷⁴ « The emphasis, again, is on the conceptual design rather than the tedious details of hardware and circuitry, from which the "new" electronics has largely liberated us » (Nicoli, Barrett et Elings 1978).

⁴⁷⁵ (Le Boss 1975).

plan des analyses historiques et épistémologiques. Au cas d'étude d'Informatek, Intertechnique et R2E devraient succéder ceux de Hewlett-Packard, Varian, Tektronix, Philipps pour les plus connus d'entre eux. Ce sera une forme de retour à nos questions centrées sur les instruments matériels eux-mêmes, dans leur mode de fabrication. D'une part, c'est parmi eux que se décident quelle électronique et quels savoirs mathématiques sont encapsulés dans les instruments. D'autre part, les fabricants sont bien les premiers concernés par la vente de ces instruments, ils sont les premiers à soutenir la dynamique générale qui est associée à tous les paramètres de l'économie des instruments : la fiabilisation des instruments, l'ergonomie d'utilisation, la mise à distance de la complexité électronique et algorithmique au cœur des instruments, la standardisation des instruments et la réduction des coûts de fabrication. En d'autres termes ce sont les moteurs industriels et économiques de la mise en « boîte noire », la miniaturisation des artefacts et le développement mathématico-logiciel qui est indispensable. C'est à l'interface de ces efforts de systématisation de la conception des instruments et de la production des instruments qu'on pourra analyser historiquement les effets de la standardisation des instruments : comment le modèle « capteur / traitement du signal et de l'information » est-il élaboré, négocié, approprié par les acteurs ? Comment se construit la discipline très hybride du traitement numérique du signal, entre les cultures du monde industriel et du monde académique ? Quelle analyse épistémologique peut-on faire de ces modes de conception des instruments, articulant artefacts matériels et logiciels ?

VI. Les instruments mathématiques, les mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument – Conclusions et perspectives

Au terme de notre exploration de l'histoire des rapports entre instrumentation et savoirs mathématiques, nous pouvons dresser un premier bilan global et provisoire sur notre approche historiographique et épistémologique. Les notions d'artefact, d'instrument et d'instrumentation que nous avons promues sont-elles opératoires en termes épistémologiques ? Quels enseignements en tirer ? Quels approfondissements paraissent nécessaires ? Dans cette dernière partie nous revenons sur la manière avec laquelle ces notions nous ont permis, d'une part, de caractériser et d'analyser des genèses instrumentales variées, d'autre part de permettre la comparaison entre différents processus d'instrumentation. Ce sera l'occasion de redire la multiplicité et la complexité des rapports entre instrumentation et savoirs mathématiques, rapports qui ne sont en rien hiérarchiques et ne se résument pas à un simple « service » de l'un pour l'autre.

Nous chercherons également à dessiner de nouvelles perspectives, de nouvelles hypothèses à explorer. Instruments de mathématiques, mathématiques des instruments, les mathématiques comme instrument : ce seront les axes retenus à nouveau pour nous guider. Pour alimenter ces réflexions nous engagerons une réinscription de différents travaux historiographiques dans notre perspective instrumentale. Nous reprendrons tout d'abord le sujet des instruments mathématiques pour l'étude des systèmes dynamiques non linéaires, que nous avons eu l'occasion d'étudier depuis plusieurs années. Puis nous introduirons des exemples d'instruments mathématiques récents très directement orientés pour l'élaboration des savoirs mathématiques : les instruments mathématiques pour la démonstration automatique de théorèmes et les « mathematical softwares ».

Pour terminer cette partie et clore ce mémoire, nous ouvrirons à nouveau la discussion autour de la question : peut-on considérer les mathématiques comme instrument ? Les études de cas précédentes nous ont fourni une matière historique sur le 20^{ème} siècle pour élaborer quelques éléments de réponses. Elles sont également une incitation à approfondir une typologie des fonctions instrumentales qui ont été dévolues aux mathématiques. Et c'est en suivant le double processus d'instrumentation et d'instrumentalisation (au sens de Rabardel) des savoirs mathématiques, pris dans plusieurs situations et contextes, que nous pourrions ouvrir de nouvelles pistes de recherche : qu'est-ce qui est susceptible de transformer des mathématiques en instrument (processus d'instrumentation) ? et de quelle manière les savoirs mathématiques sont-ils élaborés ou transformés par leur instrumentalisation ?

A. Premier bilan historiographique et méthodologique

1. Les instruments mathématiques et les mathématiques des instruments - Premiers enseignements

Nous avons fait le pari de rentrer dans la fabrique de l'instrumentation au 20^{ème} siècle en navigant par alternance sur les orbites de l'histoire de l'instrumentation contemporaine et de l'histoire des mathématiques. Ce cheminement nous a permis un renouvellement des

problématiques et des sources, et les analyses produites contribuent à l'histoire des instruments mathématiques autant qu'à l'histoire de la diffusion et de l'utilisation massive des savoirs mathématiques contemporains, jusque dans notre quotidien. C'est le premier enseignement historiographique qui nous paraît important.

Le deuxième enseignement essentiel à nos yeux est le fait que les distinctions entre les concepts d'artefact, d'instrument et d'instrumentation sont à la fois opératoires et heuristiques. Opératoires au sens où elles nous ont permis d'analyser dans le détail plusieurs processus de conception d'instruments très différents et de mettre en comparaison des modes d'instrumentation dans des domaines *a priori* distincts. Nous allons poursuivre quelques-unes de ces comparaisons dans cette partie. Grâce à ces notions nous avons pu circonscrire des manières d'associer les mathématiques à l'instrumentation et poser une notion d'instrument mathématique à la fois souple, précise et générique. Elle repose sur la distinction de trois modes d'association des mathématiques au processus de conception : les instruments dont les mathématiques mettent en forme l'artefact ; ceux dont l'usage correspond à une opération mathématique ; ceux dont l'objectif est l'élaboration de savoirs mathématiques.

C'est à travers l'exemple de l'histoire des instruments de Fourier que le caractère heuristique de ces notions a été mis en évidence. Dans le premier cas de la spectroscopie FTIR, la conception repose par principe sur un interféromètre, l'artefact matériel incontournable de l'instrument, mais nécessite une instrumentation spécifique afin de fournir le spectre recherché. Cette instrumentation a pris de nombreuses voies, des détours, qui ont pu aboutir à des impasses, en testant plusieurs matérialités d'artefacts et en cherchant à les instrumenter pour la principale fonction recherchée, celle du calcul de la transformée de Fourier de l'interférogramme mesuré permettant de remonter à l'information recherchée.

Nous avons montré que des savoirs mathématiques spécifiques sont élaborés en chemin, encapsulés dans l'instrument de FTIR : filtres mathématiques, méthodes de corrections de phases, algorithmes mathématiques, calcul de la FFT. Chacun de ces éléments est un petit instrument mathématique au service de la FTIR. Les deux premiers ont la particularité d'intervenir très directement pour pallier un défaut matériel de l'artefact interférométrique.

Dans l'exemple de la cristallographie par diffraction de rayons X, l'intervention des instruments mathématiques est différente. L'analyse de Fourier sert de guide pour théoriser un principe d'analyse cristallographique. La fonction de Patterson et les multiples dispositifs de calcul des synthèses de Fourier constituent des instruments mathématiques participant à l'interprétation des mesures de diffractions. Le premier est inventé pour remédier au problème des phases, sorte de défaut matériel incontournable du mode d'enregistrement des diffractions de rayons X.

Entrer par l'analyse de Fourier a permis de suivre des circulations de savoirs, savoir-faire et artefacts entre instrumentations : les bandes de Lipson-Beevers, les analyseurs harmoniques, les systèmes optiques pour l'analyse et la synthèse de Fourier, ou encore les ordinateurs EDSAC de l'Université de Cambridge. L'analyse de Fourier dans ses aspects mathématiques, physiques et calculatoires est sans cesse enrichie par ces circulations, réinvestie dans les instruments par les physiciens et ingénieurs, rediscutée entre praticiens des mathématiques et mathématiciens. La dimension sociale de cette instrumentation transparaît

dans ces exemples⁴⁷⁶. Il est évident qu'elle doit être saisie, en contexte, à travers les trajectoires individuelles qui fonctionnent comme des passerelles entre des cultures matérielles de laboratoires ; à travers les modes de circulation, du formel des publications à l'informel des rencontres, colloques et moments de regroupements des communautés instrumentales en construction.

L'ensemble de nos travaux est aussi une contribution à la compréhension de la variété des savoirs mathématiques impliqués dans l'instrumentation au 20^{ème} siècle. À ce titre on pourrait distinguer les savoirs mathématiques « dans » les instruments et les savoirs mathématiques mobilisés « pour » l'instrumentation. Le premier cas renvoie au processus d'encapsulation de mathématiques, qui se concrétise au niveau des artefacts : encapsuler des mathématiques est le fruit d'une instrumentalisation (au sens de Rabardel) de l'artefact. L'artefact est travaillé, mis en forme, développé pour incorporer des savoirs mathématiques. À l'exemple des instruments de Fourier, le développement peut être très long et continu sur plusieurs décennies. Dans tous les cas, une fois encapsulés, les artefacts opèrent de manière transparente pour l'utilisateur qui n'a plus besoin de connaître quels savoirs sont encapsulés, ni comment ils ont été encapsulés.

Concernant les mathématiques « pour » l'instrumentation, les savoirs mobilisés ne recouvrent pas le précédent ensemble. On peut les décomposer en trois sous-ensembles : les mathématiques de l'instrument, en particulier pour modéliser et caractériser les performances des instruments ; les savoirs mathématiques mobilisés pour assurer l'instrumentalisation des artefacts et l'encapsulation indiqué précédemment ; et les mathématiques qui servent à définir des modes d'utilisation des artefacts.

Nous venons de rappeler en quoi l'analyse de Fourier a servi pour l'instrumentation de la cristallographie, depuis son fondement, et il en est de même après les travaux de Janine Connes en FTIR : les principes mathématiques des instruments sont des catalyseurs de leurs histoires respectives. Les savoirs mathématiques mobilisés dans la conception des bandes de Lipson-Beevers se rangent dans les deux derniers sous-ensembles : d'une part, le calcul des valeurs des fonctions trigonométriques et l'analyse numérique globale de l'instrument permettent la construction de l'artefact ; d'autre part l'utilisation repose directement sur le recours à des formules trigonométriques, induisant le mode de sélection des bandes et leur utilisation. Lorsque les bandes deviennent méthodes pour le calcul sur ordinateur, l'instrumentalisation est relancée avec une substitution de l'artefact papier par l'artefact électronique : les valeurs des fonctions trigonométriques sont mémorisées dans certains systèmes, mais recalculées en temps réel dans d'autres ; les approximations sont différentes, mais les formules de base de la méthode ne changent pas.

Ce dernier exemple nous rappelle que la variété des savoirs mathématiques mis en jeu dans l'instrumentation est aussi à rapporter à la matérialité des artefacts et aux limites posées par les matérialités. Les manipulations répétées de bandes de papier et les calculs mentaux sont facteurs de nombreuses erreurs. La mécanisation et l'automatisation orientent la conception vers des systèmes mécaniques promettant des erreurs moindres, mais impliquant de nouveaux savoirs et des fragilités nouvelles. Nous avons vu un deuxième exemple avec l'introduction des

⁴⁷⁶ On notera également que le cadre sociologique proposé par Terry Shinn, celui des « Recherche-technologie » a été mobilisé de manière convaincante par Sean Johnston au sujet de la communauté de la spectroscopie FTIR dans (Johnston 2001).

systèmes optiques qui permettent un rapport très direct au calcul de Fourier mais pour lesquels la recherche de la précision a un coût très important : face à eux, l'électronique numérique a un avantage en termes de précision et d'économie du calcul. Dernier exemple, l'interféromètre a des défauts matériels corrigeables par le perfectionnement de dispositifs optiques, mais un compromis est aussi possible avec des méthodes mathématiques spécifiques pour assurer une compensation.

2. L'électronique et les transformations de l'instrumentation

Le sujet des limites matérielles est l'occasion de souligner encore toute l'importance de l'électronique dans les transformations de l'instrumentation et l'évolution des rapports de l'instrumentation électronisée aux savoirs mathématiques. La plus évidente et la plus visible de ces transformations a trait à la question du calcul, avec l'ordinateur et les projets gigantesques comme le X-RAC. Ce système analogique spécifique pour les synthèses de Fourier est une combinaison de plusieurs artefacts électroniques pour calculer et visualiser simultanément les résultats sous forme de cartes sur écran à tube cathodique. L'électronique des tubes a aussi amené avec elle la possibilité d'amplifier des signaux de manière inédite, mais avec son lot d'inconvénients en termes de « bruit de grenaille ». Les signaux à composante aléatoire poussent l'analyse mathématique classique, qui n'est ni probabiliste ni statistique, à ses limites. C'est la période qui ouvre les chapitres de l'analyse harmonique généralisée et du traitement du signal moderne, au sens de l'amélioration du rapport signal sur bruit. L'électronique est également associée à la production des signaux de haute fréquence, l'émission et réception radio, à une recrudescence d'intérêt pour les phénomènes transitoires et à l'impossibilité d'analyser ces signaux avec les systèmes non électroniques.

Depuis l'invention du transistor à l'état solide, l'électronique a progressivement basculé dans l'ère du silicium⁴⁷⁷. Il apparaît que cette électronique est aussi devenue un horizon commun de la matérialité des artefacts des instruments mathématiques contemporains, en quelques décennies. L'aspect le plus évident en est l'ordinateur, comme entité matérielle indépendante, programmable, mis en œuvre par une interface utilisateur du type clavier-écran. L'ordinateur assure des fonctions de modélisation, simulation, traitement de l'information, automatisation, contrôle, stockage, commande dans des processus de tous ordres. Le second aspect de ces transformations est lié aux formes miniaturisées d'artefacts électroniques, qui assurent des fonctions de calcul et des fonctions informatiques en partie : ce sont les puces, en particulier les microprocesseurs, enfouies dans beaucoup d'instruments et d'objets techniques. L'exemple du Micral a montré que cette instrumentation, au tournant des années 1970, n'a rien d'une simple utilisation. Elle s'est faite par étape, par adaptation et instrumentalisation logicielle du microprocesseur. Du Micral aux processeurs dédiés à la FFT, l'électronique se miniaturise en même temps qu'elle encapsule des mathématiques, enfouies dans nombre d'instruments et d'objets du quotidien. La dynamique de ces transformations, les acteurs impliqués, les projets technoscientifiques et politico-militaro-industriels qui l'alimentent, dessinent une problématique de recherches socio-historiques très vaste et encore très peu explorée, matière à des recherches doctorales prometteuses.

⁴⁷⁷ Nous soulignerons simplement ici que, si l'électronique de nos puces sont essentiellement à base de silicium, bien d'autres matériaux semi-conducteurs sont utilisés depuis les débuts de l'électronique à l'état solide, pour des applications très spécifiques.

Nous ne pouvons aujourd'hui que formuler des hypothèses sur les spécificités proposées par l'électronique en matière d'instrumentation et les manières dont elles ont été mises en œuvre historiquement. Une des premières spécificités qui nous est apparue est la possibilité de cumuler les fonctions instrumentales grâce aux moyens électroniques. L'électronique se superpose aux autres matérialités et fonctions dans les instruments, elle peut les amplifier, proposer des hybridations et les remplacer dans certains cas. L'encapsulation des savoirs, mathématiques ou autres, avec l'électronique numérique devient plus standard, plus uniforme, d'un instrument à l'autre. D'une certaine manière l'instrumentation devient partiellement un processus d'appropriation de techniques électroniques et informatiques existantes, pour répondre à l'objectif recherché.

La deuxième particularité réside dans la possibilité de séparer deux aspects des instruments : le processus de création d'un signal et le processus de traitement de l'information. Cette distinction est un sujet de débats épistémologiques et pour reprendre Davis Baird : « Now the control of information is the cutting edge of progress. This and our black-boxed instruments make it easy to overlook the material basis that this information concerns »⁴⁷⁸. C'est un appel à une certaine prudence épistémologique⁴⁷⁹. Pour Baird, l'instrument, en interagissant avec le spécimen à analyser, produit un signal qui, une fois transformé de manière adéquate, peut s'interpréter comme une information sur le spécimen. L'information est de nature sémantique, elle est porteuse de sens et se distingue du signal généré par des capteurs. Les deux notions sont bien séparées dans les éléments des instruments, mais la distinction est estompée pour l'utilisateur final qui a le sentiment d'« extraire » de l'information avec l'instrument. Dans l'instrumentation qui s'appuie, de manière de plus en plus importante depuis 1970, sur le modèle capteur – conversion – traitement numérique, le signal est converti en flux binaire : la partie numérique de l'instrument a pour tâche d'extraire l'information de ce flux. C'est une troisième spécificité de l'électronique, combinée à l'informatique : l'artefact logiciel qui permet la programmation des processeurs électroniques à partir de différents algorithmes mathématiques, fait partie intégrante du développement instrumental. Artefact matériel, artefact logiciel, le tout est inscrit dans la boîte noire qui masque et enchevêtre tous ces processus. Les tenants et aboutissants de ce mode de conception des instruments n'ont pas été analysés historiographiquement et épistémologiquement.

3. La fabrique de l'instrumentation : des acteurs et des lieux

L'extension du périmètre de nos analyses, avec de nouveaux cas d'études, devra suivre quelques orientations méthodologiques et répondre à des priorités thématiques. Nous reprenons de manière synthétique les discussions entamées antérieurement dans ce mémoire. En premier lieu il convient d'insister sur le fait que la période de l'après seconde guerre mondiale est la priorité, tant le déficit d'analyses socio-historiques et épistémologiques est patent. Cette période est d'autant plus importante qu'elle correspond à l'avènement de l'ordinateur et à un renouveau des mathématiques appliquées. L'essor des mathématiques appliquées aux États-Unis est particulièrement puissant, il a son pendant en Europe et en URSS. Il est international, associé à

⁴⁷⁸ (Baird 2004, p. 166).

⁴⁷⁹ Baird fait référence aux propos un peu trop enthousiastes du type : « Scientists naturally understand modern instruments as information processors. From this perspective many instruments function as complex systems of detecting, transforming, and processing information from an input event, typically an instrument / specimen interface, to some output event, typically a readout of information. » (Rothbart et Slayden 1994, p. 29).

des écoles nationales qui ont chacune leurs dynamiques, leurs sujets privilégiés⁴⁸⁰. L'analyse numérique, les « computer sciences », la modélisation mathématique et la simulation, les nouvelles thématiques à la frontière des sciences de l'ingénieur comme la cybernétique, la recherche opérationnelle, l'automatique et la théorie du contrôle, sont en plein essor. Jusqu'ici nous avons fait l'effort d'explorer les « à-côtés » de l'ordinateur et nous avons minimisé l'emploi du terme « mathématiques appliquées », mais l'informatique comme les mathématiques appliquées sont évidemment des repères incontournables dans les discours des acteurs de cette histoire.

Une autre raison nous pousse à insister sur le second vingtième siècle, c'est l'hypothèse de Baird quant au fait que le 20^{ème} siècle est traversé en son milieu par une « révolution de l'instrumentation », liée au statut nouveau, sérieux et légitime, pris par le sujet de l'instrumentation dans les communautés scientifiques et techniques⁴⁸¹. Baird indique que cette révolution a plusieurs autres facettes. La deuxième facette correspond au développement d'instruments déplaçables et utilisables dans de multiples contextes⁴⁸² :

*The instrumentation revolution required the development of instruments that could be built and easily transported to the site where they would be used. Smaller is better, because smaller can be moved.*⁴⁸³

Pour Baird, faire circuler les instruments c'est aussi faire circuler les savoirs qui sont encapsulés dans les instruments, et participer à l'extension de la technoscience par ce biais, extension sans précédent depuis 1950 précisément. Une troisième facette est la généralisation des boîtes noires comme manière d'encapsuler des savoirs : « Such encapsulation of knowledge into black boxes is one of the central features of the scientific instrumentation revolution »⁴⁸⁴. Ce qui nous incite à mettre l'accent particulièrement sur la décennie 1970 à nouveau, moment de l'accélération de la miniaturisation et de la mise en boîte noire des instruments de manière très générale. C'est ce que les acteurs du terrain en 1975, ferraillant avec les microprocesseurs, ont pu qualifier de « quiet revolution ».

Nous pouvons encore ajouter un troisième angle d'analyse sur la période postérieure à 1950, grâce aux travaux récents de Cyrus Mody dans son ouvrage *The Long Arm of Moore's Law, Microelectronics and American Science*⁴⁸⁵. Mody montre l'alignement du système technoscientifique américain, depuis les années 1960, sur l'impératif de la loi de Moore et sans lequel ce processus n'aurait jamais pris autant d'ampleur. La loi de Moore rythme la fabrication des puces et dicte leur renouvellement tous les deux ans : elle a été un levier fondamental dans les transformations électroniques contemporaines. La concrétisation dans l'électronisation des instruments, l'enfouissement de la microélectronique, l'encapsulage généralisé des savoirs et

⁴⁸⁰ Pour un panorama général, voir (Siegmond-Schultze et Barrow-Green 2015); sur l'essor aux États-Unis (Dahan Dalmedico 1996). La situation en France est complexe étant donné la prégnance du bourbakisme dans les mathématiques après-guerre, mais n'empêche pas l'émergence d'îlots de mathématiques appliquées : voir par exemple les trajectoires remarquables de Jacques-Louis Lions (Dahan 2005) et Laurent Schwartz (Paumier 2014).

⁴⁸¹ (Baird 2004; Peter J.T. Morris (ed.) 2002). Nous avons vu au sujet du développement de la FTIR l'importance de ces considérations, voir paragraphe II.B.3, p. 80.

⁴⁸² Nous passons ici très rapidement sur ce point, mais il faudrait souligner l'ensemble considérable de technologies qui sont nécessaires pour assurer que ces utilisations dans différents contextes sont possibles : tout ceci est le produit d'un développement industriel particulier et ne va pas de soi.

⁴⁸³ (Baird 2004, p. 155).

⁴⁸⁴ (*Ibid.*, p. 163).

⁴⁸⁵ (Mody 2017).

leur mise en boîte noire, peut se voir comme une ramification parallèle de la loi de Moore. Mais cette dynamique historique invite à poser une question symétrique : dans quelle mesure le développement de l'instrumentation scientifique et industrielle a-t-il été un moteur, et non pas un simple vecteur final, de ces transformations numériques contemporaines ? Ce type d'interrogation relance l'intérêt, s'il en est besoin, d'une analyse des projets technoscientifiques portés par les multiples acteurs institutionnels engagés sur les questions de l'instrumentation, des industriels aux structures étatiques.

Adopter la suggestion de Reinhard Sigmund-Schultze nous paraît fixer une deuxième priorité : suivre les mathématiques, pas seulement les mathématiciens⁴⁸⁶. Nous l'avons fait en nous attachant aux acteurs « non mathématiciens », au sens de la profession qu'ils exercent. Mais ils ont été mis trop souvent de côté dans l'historiographie, alors même que toutes les catégories de métiers scientifiques et techniques, à commencer par les physiciens et les ingénieurs, ont été de plus en plus formées aux mathématiques au 20^{ème} siècle. Les praticiens des mathématiques ne peuvent plus être considérés globalement comme de simples utilisateurs de savoirs mathématiques sur étagère, empruntés dans les manuels et les traités. Parallèlement, les mathématiques ont intégré le développement des moyens de production et l'industrie, et les « mathématiques industrielles » sont devenues un domaine de recherche à part entière. On notera par ailleurs que la grande association savante SIAM, fondée en 1951, regroupe dans son intitulé : Society for « Industrial and Applied Mathematics ». En 2019, toutes disciplines confondues, SIAM revendique 14500 membres. Des ingénieurs praticiens des mathématiques, et des mathématiciens de profession, sont depuis longtemps au cœur des sciences industrielles. Faut-il évoquer des noms ? De Charles Steinmetz et Stephen Timoshenko au début du 20^{ème} siècle, jusqu'à Jean Morlet plus récemment, en passant par les prodiges comme Claude Shannon ou John Tukey, tous participent à leur niveau aux transformations industrielles et mathématiques du siècle. Ce n'est pourtant que la partie émergée de l'iceberg et nous n'avons aujourd'hui qu'une vision très partielle des rapports entre ingénieurs, praticiens des mathématiques et mathématiciens au 20^{ème} siècle.

L'analyse de parcours individuels de praticiens des mathématiques d'une part, et l'analyse de collectifs, sous forme de laboratoires, institutions, centres de R&D, d'autre part, permettront seulement de préciser les savoirs mathématiques en jeu, les modes de circulations des savoirs et des instruments dans ces collectifs. La troisième priorité serait donc de se tourner davantage vers le monde industriel, comme lieu d'élaboration de savoirs et d'instruments. Pour citer de nouveau Davis Baird : « Knowledge moves between industry – technology, broadly speaking – and science in both directions and in both literary and material modalities »⁴⁸⁷. Le flux de savoirs encapsulés va dans les deux sens : de l'industrie vers la recherche scientifique et réciproquement. N'oublions pas que c'est une clé historiographique importante. Nous avons mentionné un certain nombre de très grands laboratoires de recherche privés dans ce mémoire. Les deux centres qui reviennent sans cesse sont les Bell Labs et les laboratoires d'IBM, c'est-à-dire des lieux dans lesquels le sujet des mathématiques appliquées, de l'analyse numérique et des computer sciences ont été massivement soutenus et financés. L'autre type d'acteurs dont nous avons déjà souligné l'importance sont les fabricants d'instruments eux-mêmes, dont les

⁴⁸⁶ Il l'introduit dans son analyse des travaux militaires en mathématiques durant la seconde guerre mondiale, qu'il élargit dans plusieurs directions : en termes d'acteurs, en termes de période (1915-45), en termes d'analyse des interactions entre mathématiques et industries, préliminaires à la guerre. (Sigmund-Schultze 2003).

⁴⁸⁷ (Baird 2004, p. 187).

frontières avec les fabricants de matériels informatiques sont parfois tenues, à l'image de Hewlett-Packard et Varian.

À notre connaissance, trop peu d'études de cas ont été consacrées à ces lieux et fabriques de l'instrumentation mathématique. Les travaux de l'historienne Renate Tobies sont importants de ce point de vue, car ils articulent la trajectoire de la mathématicienne Iris Runge (1888-1966)⁴⁸⁸ avec l'émergence des mathématiques industrielles, dans les années 1920-1950 en Allemagne. À partir de 1923 Runge travaille à Berlin pour la firme Osram (reprise par Telefunken en 1939) sur la production des tubes électroniques, à la fois du point de vue de la physique des tubes, et bientôt sur la qualité de la production. Elle développe, entre autres, des instruments statistiques au service de la production industrielle, du contrôle qualité, de l'organisation industrielle. Ces travaux font écho aux mathématiques industrielles qui se développent outre-Atlantique dans les Bell Labs en particulier. Les deux promoteurs les plus connus sont George Campbell (1870-1954), dont nous avons évoqué les travaux au sujet des calculs de Fourier (voir IV.E, page 185) et Thornton C. Fry (1892-1991), auteur de multiples travaux comme ingénieur-mathématicien, connu pour son traité *Probability and its engineering uses* de 1928. Fry est surtout, pour ce qui nous occupe, l'auteur du rapport de 1941 intitulé « Industrial mathematics »⁴⁸⁹ et le principal pilote du Mathematical Research Department aux Bell Labs depuis les années 1920 : c'est dans ce département qu'exerceront John R. Carson (1886-1940) et par la suite Claude Shannon, John Tukey ou encore Richard Hamming⁴⁹⁰.

La toile de fond est assez claire puisqu'il s'agit de massifier la production, assurer une standardisation et normalisation croissante, et donc de développer des instruments d'organisation et de contrôle adéquats. Ils sont adaptés à la production de tubes électroniques très délicats à produire, d'une part, et au contrôle de pièces trop nombreuses pour être examinées une par une, d'autre part, ce qui explique le recours aux statistiques comme nouvelle colonne vertébrale des mathématiques du contrôle de la qualité. Les formes prises par ces divisions de mathématiciens dans l'industrie, leur organisation et les modalités des interactions avec les autres divisions, en revanche, sont beaucoup moins connues. Tout comme le sont les travaux et la formation de ces mathématiciens industriels, alors qu'ils sont des acteurs de plus en plus importants de la production industrielle en constante accélération au 20^{ème} siècle.

B. Les instruments de l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires

En revisitant l'historiographie des savoirs mathématiques au 20^{ème} siècle, il apparaît qu'un certain nombre de chapitres sont susceptibles d'alimenter nos réflexions moyennant un travail de réinscription dans notre perspective instrumentale. Nos propres travaux sur l'histoire des systèmes dynamiques non linéaires en fait partie. Leur histoire a été déjà évoquée en contre-

⁴⁸⁸ Nous renvoyons à l'ouvrage de R. Tobies, *Iris Runge: A Life at the Crossroads of Mathematics, Science, and Industry* (Tobies 2012). Iris Runge est une des filles du mathématicien Carl Runge. Elle a suivi sa formation en mathématiques et physique à l'Université de Göttingen, berceau du renouveau des mathématiques appliquées en Allemagne.

⁴⁸⁹ (Siegmund-Schultze et Barrow-Green 2015). Le rapport est commandé par le National Research Council, pour un « Survey of Industrial Research » ; il est publié sous différentes formes, et très diffusé, dans le journal des Bell Labs (Fry 1941) ainsi que dans la revue *American Mathematical Monthly*.

⁴⁹⁰ L'ouvrage (Fagen, Joel et Schindler 1984) donne quelques éléments sur la constitution de ce Mathematical Research Department. Pour un aperçu plus global sur sa place et ses interactions avec le reste des Bell Labs, on peut consulter (Gertner 2013).

point dans l'histoire de l'analyse de Fourier et des instruments de Fourier⁴⁹¹. Dans la théorie et la pratique, cette analyse des systèmes non linéaires a en effet mobilisé des instruments « non Fourier » pour ainsi dire. Les rapports entre les savoirs mathématiques et la conception de quelques instruments dans ce domaine ont déjà été analysés de manière classique : en considérant essentiellement les résultats numériques produits par les instruments d'une part, ou en se focalisant sur les pratiques de calcul des acteurs d'autre part. Les instruments eux-mêmes sont rarement l'objet d'investigation, pourtant ils jalonnent cette histoire et sont associés à des praticiens des mathématiques, ingénieurs-mathématiciens ou physiciens-mathématiciens ou simplement mathématiciens.

Afin de ne pas dresser un simple catalogue, nous pouvons distinguer les instruments en jeu non pas par leur matérialité, mais par le type d'opérations qu'ils réalisent :

- des dispositifs directement liés à un comportement oscillatoire précis, donc très spécifiques d'une opération et d'un usage ;
- des dispositifs conçus pour répondre de manière plus générique à l'analyse d'oscillations non linéaires, par une simulation analogique ;
- enfin les dispositifs génériques que sont les ordinateurs, utilisés pour simuler numériquement, soit des équations différentielles (systèmes continus), soit des itérations (systèmes discrets), afin de les étudier expérimentalement et graphiquement.

Dans la première catégorie nous pouvons inscrire des artefacts-instruments très simples, comme les circuits électroniques à tubes triode du début du 20^{ème} siècle. Les oscillations sont observées directement sur les circuits, par des mesures électriques et des visualisations à l'oscilloscope. Elles sont modélisées mathématiquement avec des équations différentielles par les ingénieurs André Blondel et Balthazar van der Pol autour de 1920. L'analyse des oscillations non linéaires combine une approche mathématique de modélisation avec la fabrication de ces circuits et leur observation empirique. L'instrument ici se réduit quasiment à l'artefact lui-même, considérant que le circuit électronique est, en pratique, un modèle analogique des équations mathématiques.

Avant les années 1920, les barrières entre domaines technologiques cloisonnent beaucoup les analyses et les résultats. Les artefacts-instruments restent très spécifiques d'une question technologique et d'un comportement oscillatoire. Les années 1920 marquent un moment de multiplication des analogies entre comportements oscillants de natures différentes, préliminaires à des généralisations théoriques autour de notions comme les « oscillations de relaxation » (1926). Les ingénieurs-mathématiciens se prennent d'une ambition théorique de plus grande envergure avec les travaux d'Alexander Andronov sur les « auto-oscillations » (1929), aboutissant à une théorie générale des oscillations non linéaires. Prolongeant les modélisations des circuits, les travaux de van der Pol ont dégagé une équation différentielle,

⁴⁹¹ Rappelons que l'analyse des oscillations non linéaires a été stimulée par la nouvelle donne technique liée à l'électronique et les technologies radio naissantes, au début du 20^{ème} siècle. Ce n'est pas la seule raison à l'intérêt porté au non linéaire, puisque des artefacts mécaniques ou électriques ont bien antérieurement suscité des questions scientifiques et techniques sur le sujet. Mais ces dernières sont restées isolées les unes des autres, et sous-théorisées pendant longtemps. (Ginoux et Petitgirard 2010b; Ginoux 2015). Nous avons introduit le sujet dans ce mémoire par une citation tranchée de Nicolas Minorsky indiquant que les « cycles limites » de Poincaré doivent se substituer aux sinusoides de Fourier dans l'analyse des oscillations non linéaires, voir page 189.

qui porte son nom depuis, devenue une sorte de drosophile des oscillations de relaxation⁴⁹². L'étude de l'équation-circuit est emblématique du paradigme non linéaire en train de se construire, en s'écarter de l'analyse de Fourier : l'analyse harmonique, mathématique et instrumentale, n'est d'aucune utilité dans ce cas⁴⁹³.

Avec les oscillations de relaxation, les analogies entre comportements oscillatoires non linéaires se généralisent, mais leurs modélisations en termes mathématiques sont proches. Cela se répercute dans l'introduction de nouveaux artefacts, plus génériques, qui coexistent avec les précédents. Les travaux de l'ingénieur-mathématicien Nicolas Minorsky concernant les « analogues dynamiques » élaborés en 1935 vont dans ce sens précisément⁴⁹⁴. Minorsky est au MIT, dans le département d'Electrical Engineering dirigé par Vannevar Bush lorsqu'il imagine son système de calcul. Ce dernier perfectionne depuis déjà plusieurs années les analyseurs différentiels, utilisés pour l'intégration des équations différentielles. Minorsky est immergé dans un milieu porté sur la conception d'instruments mathématiques, dans une épistémologie des mathématiques à contre-courant des « formalistes »⁴⁹⁵ et à laquelle il adhère pleinement.

Minorsky conçoit un instrument mathématique, supposé dépasser l'analyseur différentiel pour l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires, tout en restant dans le cadre des calculateurs analogiques. Le principe est posé en 1935, suivi d'une première réalisation en 1936. Mais le projet est abandonné rapidement, Minorsky quittant le MIT et retournant à ses activités pour l'US Navy.

Contrairement à la machine de Bush, les artefacts utilisés par Minorsky sont d'abord électromagnétiques : le principe repose sur les oscillations d'une spire placée dans le champ magnétique à l'intérieur d'une bobine. Les modulations des courants dans les circuits de la bobine et de la spire provoquent des oscillations de la spire, lesquelles suivent des équations différentielles du second ordre dont les termes peuvent être constants, ou périodiques, ou non linéaires, selon ces modulations. L'information sur les fonctions non linéaires à intégrer dans les équations est entrée soit mécaniquement soit par un système optique, un « photo-intégraphe » inventé au MIT par V. Bush et son élève Truman Gray en 1936.

L'assemblage d'artefacts est hétérogène au regard de la systématisation opérée dans la conception des analyseurs différentiels de Bush. Minorsky en analyse lui-même les limites et l'intérêt pour l'exploration des équations différentielles non linéaires. Comme pour beaucoup de dispositifs analogiques, il est rapide mais peu précis. Mais le manque de précision n'est en rien un inconvénient aux yeux de Minorsky, car l'instrument doit servir à explorer les courbes

⁴⁹² L'ingénieur Philippe Le Corbeiller sera un des promoteurs en France des travaux sur les oscillations de relaxation. Il exprime ainsi en 1931 dans une conférence au Cnam les spécificités des comportements observables sur l'équation de van der Pol, dans le cas du paramètre ε très grand : « Ici la courbe des oscillations a visiblement un très grand nombre d'harmoniques ; en langage mathématique, la série de Fourier correspondante converge très lentement. Il est donc absolument illusoire dans ce cas de calculer plus ou moins péniblement les un, deux ou trois premiers termes de la série. Un des apports les plus consistants de M. van der Pol a consisté à reconnaître clairement ce fait, à donner un nom à ces oscillations non sinusoïdales, et à en faire un outil de la recherche physique, au même titre que les oscillations sinusoïdales dont elles constituent en fait la contrepartie. » (Le Corbeiller 1931, p. 22).

⁴⁹³ C'est aussi ce qui oblige à changer de méthodes de calcul de solutions, van der Pol reprenant la méthode des isoclines, une méthode graphique approchée, pour étudier son équation.

⁴⁹⁴ Pour leur analyse plus complète : (Petitgirard 2015).

⁴⁹⁵ C'est le terme employé par Bush dans son célèbre texte « Instrumental analysis » (V. Bush 1936).

solutions de systèmes dynamiques non intégrables analytiquement. La possibilité de visualiser les courbes et d'obtenir des informations qualitatives sur la topologie des solutions priment sur la recherche de précision.

Cependant, ni les analyseurs différentiels, ni les analogues dynamiques ne remplacent les systèmes spécifiques. C'est encore valable dans les années 1950-60, alors même que les ordinateurs génériques offrent des moyens de calcul et de visualisation pour les systèmes dynamiques. Dans un contexte de pénurie de moyens calculatoires, l'équipe de « Dynamique théorique » de l'ingénieur-mathématicien Théodore Vogel a fait le choix du spécifique et de l'élaboration de ses propres instruments mathématiques⁴⁹⁶. Michel Jean, dans sa thèse réalisée entre 1962 et 1965, a par exemple conçu un oscillateur mécanique modélisant l'équation de Duffing. L'objectif est l'exploration des solutions périodiques de l'équation, comme manière d'élucider la structure de l'ensemble des solutions de l'équation. L'instrument mathématique de calcul analogique mécanique est totalement dédié à cette exploration, et il permet surtout la visualisation des solutions dans le plan de phase de l'équation. Peu importe la précision médiocre de l'instrument, il vise à donner l'allure du portrait de phase, les périodicités, les points singuliers et les instabilités.

Tous ces instruments s'inscrivent dans une longue histoire du calcul analogique pour l'analyse des systèmes dynamiques, dont nous connaissons quelques cas emblématiques, mais sans vision globale sur la période 1920-1970 durant laquelle ces instruments sont conçus et utilisés. L'ultime artefact à ajouter serait l'ordinateur analogique commercial, destiné aux laboratoires de recherches. Nous connaissons un de ces utilisateurs les plus importants dans l'histoire du chaos, Otto RöSSLer, manipulant un Dornier DO 240 de fabrication allemande à partir de 1971⁴⁹⁷. RöSSLer l'utilise comme moyen d'étudier rapidement des systèmes dynamiques très simples et obtenus par des raisonnements analogiques très originaux entre réactions chimiques et circuits électroniques. Puis une fois l'architecture générale du système dessinée avec de tels raisonnements, le Dornier est utilisé comme moyen de calibrage des paramètres des systèmes dynamiques chaotiques.

Au moment où RöSSLer élabore ses systèmes chaotiques, dans les années 1970, les technologies informatiques ont déjà été expérimentées pour l'analyse des systèmes dynamiques non linéaires. Elles l'ont été même très tôt dans l'histoire des ordinateurs, qui constituent la troisième catégorie d'instruments mathématiques génériques qui ont permis l'élaboration de savoirs mathématiques nouveaux sur les systèmes dynamiques après la seconde guerre mondiale. Le mathématicien Stanislaw Ulam en est un acteur central, animateur de plusieurs projets et partisan de faire des « expériences mathématiques » avec tous les nouveaux systèmes informatiques émergents⁴⁹⁸. Sa toute première expérience est liée à l'élaboration de la méthode Monte-Carlo, avec John von Neumann, vers 1949. Elle sera mise en œuvre sur l'ENIAC avec

⁴⁹⁶ Les travaux de Vogel et son groupe ont été analysés dans (Petitgirard 2018a). Avant Michel Jean, un autre élève de Vogel, Leftéri Sidériades a travaillé sur des circuits électroniques, en particulier dans sa thèse de 1956, « Méthodes topologiques appliquées à l'électronique ». Dans la pratique, un circuit électronique est le propre instrument d'exploration du modèle. Sidériades a surtout cherché à montrer comment les mathématiques des systèmes dynamiques, la topologie en particulier, permettent d'assister la conception des circuits électroniques, tels que son système de bascule à 4 positions stables.

⁴⁹⁷ Nous avons analysé ses pratiques analogiques singulières dans (Petitgirard 2004) et Otto RöSSLer a écrit plus récemment quelques lignes autobiographiques, évoquant son Dornier dans (RöSSLer et Letellier 2013).

⁴⁹⁸ Voir : (Petitgirard 2004; Ulam 1976; Weissert 1997).

Nicholas Metropolis au Laboratoire de Los Alamos. Le contexte de la recherche nucléaire dans lequel tout cela s'inscrit est bien connu. L'instrumentalisation de l'ENIAC pour des questions qui dépassent les calculs de tables de tir, débute par la mise en œuvre d'une programmation balbutiante pour les calculs de Monte-Carlo⁴⁹⁹.

Ulam, associé aux physiciens Enrico Fermi et John Pasta, participe aux expériences Fermi-Pasta-Ulam entre 1953 et 1955. Il s'agit d'une nouvelle série d'expériences numériques sur la machine MANIAC de Los Alamos, dans l'idée d'étudier la répartition de l'énergie sur les différents modes de vibration d'un modèle de corde vibrante, fixée à ses extrémités⁵⁰⁰. Puis les expériences mathématiques à Los Alamos, avec le physicien Paul Stein, sur le nouvel ordinateur MANIAC II installé en 1958 auront un impact considérable sur l'analyse des systèmes dynamiques discrets. En 1964, Stein et Ulam analysent systématiquement et expérimentalement des systèmes d'itérations. Ils cherchent à les classer selon leurs comportements asymptotiques. Le calculateur est branché sur un système permettant la visualisation des itérations. Ces recherches sont autant calculatoires que graphiques : par exemple, la convergence vers un ensemble limite est observée sur l'écran mais n'est pas toujours facilement évaluée numériquement.

Le groupe formé par Nicholas Metropolis, Paul Stein et Myron Stein, toujours à Los Alamos poursuivent ces travaux sur les itérations jusqu'en 1971, sur les ordinateurs gigantesques du laboratoire. Ils auront une influence sur les recherches des années 1970 aboutissant aux scénarios de transition vers le chaos, par doublement de période. Les physiciens Mitchell Feigenbaum, Pierre Coullet, Charles Tresser organisent leurs propres expériences numériques, mais sans les moyens colossaux du Los Alamos. C'est même tout l'inverse, Feigenbaum utilise une petite calculatrice programmable HP-65, Coullet et Tresser mobilisent une table traçante pour visualiser les transitions dans les systèmes dynamiques à paramètre.

Les recherches sur les systèmes dynamiques modélisés par des équations différentielles ordinaires ont une histoire parallèle, dans laquelle les travaux du météorologue Edward Lorenz constituent un maillon essentiel⁵⁰¹. Les simulations numériques de modèles simplifiés de la mécanique des fluides, autour de 1960, sont réalisées sur un modeste calculateur numérique, un Royal McBee LGP-30. Quinze ans plus tard, le physicien Oscar Lanford III produira les premiers rendus graphiques des portraits de phase de ce qui devient l'attracteur de Lorenz, autour de 1975. Nous sommes bien dans la décennie 1970 marquée par l'émergence des calculatrices programmables, des mini-ordinateurs compacts avec des capacités graphiques, investis dans tous les domaines. L'ère du chaos au tournant de 1980 est aussi celle d'une micro-informatique plus conviviale, graphique et suffisamment performante grâce aux dernières générations de microprocesseurs. Pour ainsi dire, tous les spécialistes des aspects calculatoires

⁴⁹⁹ Pour des analyses très récentes de l'invention des modes de programmation d'ENIAC, voir (Haigh, Priestley et Rope 2016).

⁵⁰⁰ Elles visaient à observer les propriétés statistiques du système dynamique, qui, contrairement au comportement attendu, n'atteint pas un état d'équipartition de l'énergie. (Weissert 1997; Petitgirard 2004)

⁵⁰¹ Lorenz a lui-même beaucoup décrit son processus de recherche et d'utilisation de son ordinateur (Lorenz 1993), indiquant très tôt l'inspiration trouvée dans la pratique de Stanislaw Ulam : « We thus see that a computing machine may play an important role, in addition to simply grinding out numerical answers. The machine cannot prove a theorem, but it can suggest a proposition to be proven. The proposition may then be proven and established as a theorem by analytic means, but the very existence of the theorem might not have been suspected without the aid of the machine. Ulam has discussed the general problem of the computing machine as a heuristic aid to mathematical reasoning, and has presented examples from a number of different branches of mathematics. » (Lorenz 1964, p. 10-11).

pour les systèmes dynamiques se convertissent au numérique : Otto Rössler abandonnera son Dornier au profit de l'ordinateur de bureau HP-9845 pour ses travaux décisifs sur les systèmes chaotiques de la fin de la décennie.

L'histoire de l'instrumentation mathématique, matérielle et logicielle, pour l'analyse des systèmes dynamiques est encore à écrire pour une bonne partie, nous n'avons souligné et analysé que quelques moments clé pour le moment. Deux constantes en ressortent cependant, la première est liée à la demande de visualisation des solutions des équations, quelle que soit la matérialité du système dynamique. Calculer les solutions de manière précise n'est qu'une facette de l'instrumentation conçue pour ces analyses, et la mise en image des solutions, comme moyen heuristique d'analyse de leur géométrie et leur topologie, est une exigence imposée à la conception des instruments. La seconde constante est la pratique très expérimentale de l'analyse des systèmes dynamiques qui sous-tend les genèses instrumentales, reflet d'une épistémologie empiriste de la construction des savoirs mathématiques couramment répandue parmi ces praticiens des mathématiques.

C. Sur quelques instruments mathématiques récents pour élaborer des savoirs mathématiques

À la suite des exemples précédents, nous allons enrichir la catégorie des instruments mathématiques dont l'objectif est l'élaboration de savoirs mathématiques. De tels instruments se rapportent d'une manière ou d'une autre à un obstacle épistémique sur le chemin de la construction de savoirs mathématiques : par exemple lorsqu'un problème mathématique ne trouve pas de solution analytique, soit parce que le chemin vers la solution est trop difficile, soit parce qu'il est mathématiquement démontré que le traitement analytique est impossible ; ou encore dans la situation d'un problème mathématique qu'il faut explorer qualitativement. Pour analyser les instruments adaptés à ces situations nous distinguerons, provisoirement et de manière *ad hoc*, quatre fonctions instrumentales : fonction heuristique, fonction calculatoire, fonction de représentation graphique, fonction de démonstration.

Les fonctions heuristiques et calculatoires sont anciennes. Calcul approché, simulation analogique, associés à la fonction de représentation graphique, sont courants dans l'histoire des théories des systèmes dynamiques, mais ne sont qu'un aspect contemporain de ces fonctions instrumentales séculaires. L'exploration de l'hypothèse de Riemann dans les années 1930, entre la mécanisation de calculs mécanographiques massifs de Titchmarsh et Comrie, et l'alternative imaginée par Alan Turing en 1939, sous forme de calculateur analogique, en sont un autre exemple que nous avons rencontré (voir IV.F.3, page 192).

Le renouvellement récent de ces fonctions est plus directement lié à l'informatique. L'ordinateur est un instrument mathématique qui ouvre la voie à de nouvelles explorations empiriques de propriétés mathématiques. Il permet d'envisager des nouveaux modes de démonstration mathématique automatisée et régénère l'idée de développer des « mathématiques expérimentales ». Ce sont les deux perspectives que nous allons suivre à grands traits dans leur développement historique. Le premier volet des systèmes automatisés de démonstration nous renvoie à la démonstration assistée par ordinateur du théorème des quatre couleurs, en 1976, qui a été mis en avant par Gilles Dowek pour appuyer l'idée selon laquelle les mathématiques sont entrées dans la phase instrumentée de leur histoire. Le second fait écho à la création de la revue *Experimental mathematics* en 1992 et au mouvement en faveur de la promotion d'une pratique et d'une discipline du même nom. Le point commun entre ces deux

exemples est bien l'artefact ordinateur avec ses deux dimensions : une de nature microélectronique, l'autre de nature logicielle qui s'appuie sur des algorithmes. Si la pratique informatique tend à séparer ces deux aspects, dans la conception des instruments mathématiques il est moins évident que l'un ne va pas sans l'autre. Ainsi l'instrument mathématique, même s'il s'appelle « mathematical software », reste un programme, c'est-à-dire un modèle physique d'un algorithme mathématique.

1. Fabriquer des instruments pour démontrer des théorèmes mathématiques

La question des instruments mathématiques pour la démonstration de théorèmes a été mise en lumière en 1976 avec l'annonce de la démonstration du théorème des quatre couleurs par Wolfgang Haken et Kenneth Appel⁵⁰². Le théorème se formule en des termes très simples : il est possible de colorier n'importe quelle carte découpée en parties connexes, de manière à ce que deux parties limitrophes soient toujours de couleurs distinctes, en utilisant seulement quatre couleurs. Les travaux préparatoires de Haken et Appel ont permis de limiter à environ 1500 le nombre de cartes à étudier, soumises ensuite à un calcul combinatoire par ordinateur : 1 mois et demi de calculs (1200 heures) au milieu des années 1970. Aujourd'hui encore on ne sait pas se passer de l'ordinateur pour démontrer le théorème. À supposer même qu'on imprime intégralement la preuve telle qu'elle se déroule dans l'ordinateur, elle serait trop longue à analyser par un esprit humain⁵⁰³.

L'épisode a marqué symboliquement la communauté des mathématiciens, interrogeant la validité de cette preuve et posant une question, qui n'est pas inédite en elle-même puisqu'elle traverse toute l'histoire des mathématiques : qu'est-ce qu'une démonstration en mathématique ? L'utilisation de l'instrument informatique est controversée pour deux raisons : la démonstration n'explique pas au sens où elle ne permet pas de donner une intelligibilité de la preuve à l'être humain ; et elle n'emporte pas facilement la conviction des mathématiciens. Le registre de ces réactions, en forme de réflexes psycho-sociaux, n'est pas tout à fait inédit non plus. Les débats ont été intenses et d'autant plus importants que la conjecture sur les quatre couleurs est un problème qui résiste à la sagacité des mathématiciens depuis qu'il a été posé au milieu du 19^{ème} siècle. L'ordinateur s'est présenté très tôt comme un recours et l'exploration informatique du problème des quatre couleurs a commencé dans les années 1960.

Le résultat de 1976 a été très discuté, mais il masque les nombreux efforts de conception d'instruments mathématiques pour la démonstration, depuis les années 1950, à l'interface des mathématiques et des technologies informatiques naissantes. A ce jour, pour ce qui est de cette préhistoire des programmes d'aide à la démonstration, les travaux les plus précis sont ceux de l'historienne Stephanie Dick, de l'University of Pennsylvania⁵⁰⁴. Elle a analysé trois projets :

- la « Logic Theory Machine » de Herbert Simon, Allen Newell et John Clifford Shaw, développée dans les années 1950 à la RAND corporation, en Californie ;

⁵⁰² Publié en 1977 « Every planar map is four colourable » (Appel et Haken 1977) .

⁵⁰³ Nous renvoyons aux nombreuses présentations et controverses discutées dans (Tymoczko 1998; Fritsch et Fritsch 1998; Doweck 2011).

⁵⁰⁴ Nous renvoyons essentiellement à son PhD obtenu en 2014 « After Math: (Re)configuring Minds, Proof, and Computing in the Postwar United States » (Dick 2015b) et l'article : « Of Models and Machines: Implementing Bounded Rationality » (Dick 2015a).

- le « Program P » de Hao Wang, au sein des Bell Labs, puis à l'IBM Research Laboratory à Poughkeepsie (état de New York), à la fin des années 1950 ;

- l'« Automated Reasoning Assistant » (AURA), développé au début des années 1970 par un groupe de l'Applied Mathematics Division du Argonne National Laboratory à côté de Chicago.

Trois projets et trois approches différentes : le premier vise à simuler l'esprit humain, le second cherche à le surpasser, le troisième s'oriente sur un logiciel de démonstration de théorèmes qui puisse collaborer avec un utilisateur humain. Les travaux de S. Dick nous montrent que l'implémentation sur les artefacts que constituent les ordinateurs des années 1950, est une véritable instrumentalisation (au sens de Rabardel) : tous les artefacts en jeu, qu'il s'agisse de cartes perforées, de circuits électroniques qui ne sont pas encore miniaturisés, des moyens plus formels, comme les algorithmes, sont taillés à la mesure des lourdes contraintes matérielles, qui obligent à une interrogation permanente sur les ambitions de ces programmes et la notion même de preuve. L'horizon des projets est également relié à des programmes d'intelligence artificielle, en particulier encouragés par le pionnier de l'informatique John McCarthy⁵⁰⁵, interrogeant au-delà de la notion de preuve, les modes de pensée mathématique ou la place de l'intuition dans les raisonnements.

Le contexte dans lequel ces projets s'inscrivent est également décisif car les laboratoires impliqués sont hors du système académique traditionnel : ce sont notamment le *think tank* de la RAND, les laboratoires de R&D privée des Bell Labs et d'IBM, le laboratoire d'Argonne, actif sur les recherches dans le domaine nucléaire et issu du Projet Manhattan. Les controverses sur la nature des preuves mêlent le technique, le social et l'institutionnel.

De tels projets, s'ils sont liés à l'émergence de l'ordinateur, ne sont pas sans histoire. L'idée de mécanisation et d'automatisation du raisonnement n'est en fait pas propre à cette ère informatique. Les racines de ces projets d'automatisation des démonstrations se trouvent dans le 19^{ème} siècle, avec les travaux des algébristes anglais comme Charles Babbage (1791-1871) et George Boole (1815-1864)⁵⁰⁶. Après les années 1960, le rapport aux artefacts évolue rapidement avec la microélectronique, le microprocesseur, les interfaces utilisateurs et les langages de programmation de haut niveau. À partir des années 1970 l'accès à ces instruments est bien plus facile, en témoigne l'utilisation d'un démonstrateur très simple par Haken et Appel. Avec les PCs et les stations de travail des années 1980, leur disponibilité est assurée à un très grand nombre de scientifiques : les mathématiciens et praticiens des mathématiques ont accès à un instrument mathématique versatile, souple, avec des outils déjà élaborés pour les assister. Qu'en est-il dans les pratiques des mathématiciens en réalité ? À ce jour aucune enquête socio-historique sur le déploiement et les transformations des pratiques dans les laboratoires n'a été réalisée à notre connaissance.

⁵⁰⁵ McCarthy a posé le terme d'intelligence artificielle en 1955, promoteur à partir de 1958 de programmes spécifiques pour la démonstration automatique. Nous renvoyons à l'ouvrage *Machines who think* (McCorduck 1979) et (Dick 2015b).

⁵⁰⁶ Voir en particulier les travaux (Durand-Richard 2004). Le premier est le célèbre inventeur de la « machine à différences » et la « machine analytique », des calculateurs mécaniques de grande ampleur, pour automatiser le calcul de tables mathématiques. Le second, parmi ses travaux fondateurs de la logique moderne, a défini l'algèbre binaire qui porte son nom (algèbre de Boole). Babbage imaginait que la partie calculatoire d'une algèbre de l'infini pouvait être mécanisée ; Boole imaginait que la logique pouvait l'être.

2. Les mathématiques expérimentales et les « mathematical softwares »

Par ailleurs, s'il est un instrument mathématique plus général, dont la très grande diffusion et l'utilisation sont avérées, englobant des modalités de démonstrations formelles, ce sont les « mathematical softwares ». Les plus connus des années 1980-2010 ont été Matlab, Maple et Mathematica. Leur commercialisation depuis 35 ans a été massive. À titre indicatif, MathWorks, société éditrice de Matlab, estime à 2 millions le nombre d'utilisateurs (mathématiciens, physiciens, ingénieurs...) répartis en 84 000 sites à travers le monde⁵⁰⁷. Nous proposons de donner les contours de l'émergence de ces instruments mathématiques, qui ont eu un impact direct dans les initiatives de faire émerger un domaine autonome de « mathématiques expérimentales ». Le lancement de la revue *Experimental mathematics* en 1992 en a été un temps fort, et controversé⁵⁰⁸. Depuis deux décennies ce domaine se définit sur son mode de fabrication de mathématiques assistée par ordinateur. L'introduction du livre *Mathematics by experiment* indique les multiples rapports à l'assistance informatique :

This new approach to mathematics—the utilization of advanced computing technology in mathematical research—is often called experimental mathematics. The computer provides the mathematician with a “laboratory” in which he or she can perform experiments: analyzing examples, testing out new ideas, or searching for patterns. Our books are about this new, and in some cases not so new, way of doing mathematics.

To be precise, by experimental mathematics, we mean the methodology of doing mathematics that includes the use of computations for: (1) gaining insight and intuition; (2) discovering new patterns and relationships; (3) using graphical displays to suggest underlying mathematical principles; (4) testing and especially falsifying conjectures; (5) exploring a possible result to see if it is worth formal proof; (6) suggesting approaches for formal proof; (7) replacing lengthy hand derivations with computer-based derivations; (8) confirming analytically derived results.

Note that the above activities are, for the most part, quite similar to the role of laboratory experimentation in the physical and biological sciences. In particular, they are very much in the spirit of what is often termed “computational experimentation” in physical science and engineering, which is why we feel the qualifier “experimental” is particularly appropriate in the term experimental mathematics.⁵⁰⁹

L'ouvrage est une sorte de manifeste pour défendre des expériences mathématiques qui, par ailleurs, rentrent dans les quatre fonctions instrumentales que nous avons mises en avant : heuristique au sens de tests d'hypothèses, de nouvelles idées, de recherches de régularités ; graphique ; calculatoire, avec des fonctions de calcul formel en plus du calcul approché ; aide à la démonstration. Il promeut une pratique des mathématiques utilisant des instruments pour assister l'élaboration de résultats mathématiques nouveaux et assurer leur justification. Nous nous limiterons à explorer ce qui constitue l'artefact logiciel de ces instruments du « laboratoire » du mathématicien : les « mathematical softwares ». Ces « mathematical softwares » sont des logiciels inventés pour résoudre des problèmes mathématiques rencontrés dans tous les champs de la recherche scientifique et technique, y compris mathématiques. La traduction littérale de « mathematical software » en français donnerait « logiciel

⁵⁰⁷ Source : [URL : <https://fr.mathworks.com/company/aboutus.html> consulté le 28/04/2019].

⁵⁰⁸ Ce site Web regroupe de nombreuses ressources autour du sujet : [URL : <https://www.experimentalmath.info/> consulté le 3/05/2019].

⁵⁰⁹ (Borwein et Bailey 2004, p. 2-3). L'ouvrage a une sorte de jumeau : *Experimentation in mathematics : computational paths to discovery* (Borwein, Bailey et Girgensohn 2004).

mathématique » mais le terme anglais recouvre aussi le sens de « logiciel de mathématiques » : nous garderons le terme anglais par commodité, en essayant de préciser en cas de besoin.

Du fait des fonctions mathématiques qu'ils remplissent et de leur mode de fabrication, de l'économie de ces logiciels et de leur percolation dans le monde académique et industriel, la constitution du champ de recherche et d'ingénierie de ces « mathematical softwares » nous semble mériter une analyse très poussée qui peut donner matière à une recherche doctorale. Nous nous contenterons d'indiquer quelques repères historiographiques et épistémologiques pour préciser les contours et ambitions d'une telle recherche.

Ces logiciels sont en effet le produit des travaux d'une communauté internationale de chercheurs créée dans les années 1970, autour d'une revue centrale (*ACM- TOMS -Transactions on Mathematical Software*). Ils incarnent une pensée et une pratique du développement d'instruments mathématiques à l'articulation entre le monde des programmeurs, des analystes numériques, et des utilisateurs, scientifiques et ingénieurs. Leur objectif est double : rendre accessible au plus grand nombre ces outils et remplacer des pratiques « naïves » en matière d'outils informatiques pour les mathématiques⁵¹⁰.

3. Aux origines des « mathematical softwares »

L'historiographie des « mathematical softwares » est très embryonnaire et essentiellement américaine : nous nous appuyons sur le travail de Thomas Haigh⁵¹¹ et exploitons ici la revue *ACM-TOMS* (qui existe depuis 1975) comme source primaire de notre brève analyse de leur développement. Leurs racines remontent aux initiatives informatiques des années 1960 visant la constitution de bibliothèques de routines de calcul et de mathématiques pour les grands ordinateurs. Le calcul scientifique et l'analyse numérique sur ordinateur passent par un langage en particulier, inventé à dessein en 1957, le Fortran (acronyme de « Formula Translation ») suivi de multiples mises à jour et extensions. L'adhésion de la communauté académique à ce langage est très large et appuyée par les industriels de l'informatique.

Le développement des « mathematical softwares » est attaché au souci de trouver les meilleurs programmes, les partager, les évaluer, les fiabiliser : il faut souligner que la rareté des ordinateurs, le coût d'exploitation de ces machines, leur faible puissance et leur mémoire limitée rendent nécessaire l'optimisation de chaque programme jusque dans les années 1970. Comme il s'agit de contraintes pesantes depuis les premières heures des ordinateurs, peut-être faudrait-il étendre ces racines aux toutes premières méthodes de programmation d'une génération d'ordinateurs pour laquelle il n'existait que le langage machine et l'assembleur. Les routines pour calculer des solutions à des problèmes mathématiques sont conçues au fur et à mesure, sans coordination particulière, et déterminées par une volonté de partager entre initiés les méthodes implémentées. D'où leur publication dans une revue telle que les *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*⁵¹².

⁵¹⁰ Cette naïveté est en quelque sorte symétrique entre des chercheurs qui n'ont pas les clés d'un génie logiciel efficace et des spécialistes de l'analyse numérique qui ont une vision trop simpliste de l'utilisation possible de leurs routines de calcul.

⁵¹¹ T. Haigh a pu interviewer quelques pionniers (dont John R. Rice) et publier sur le sujet dans *IEEE Annals of History of Computing* : (Haigh 2008; Haigh 2010).

⁵¹² A l'image de la présentation du code pour la solution de l'équation de Laplace pour la machine commerciale d'UNIVAC en 1949 (Snyder et Livingston 1949). Une des premières systématisations de la programmation, avec

Passée l'heure des ordinateurs gigantesques et trop rares, les années 1960 marquent un temps d'accélération des expériences mathématiques. Le symposium de 1967 sur « Interactive Systems for Experimental Applied Mathematics » marque un temps fort de ces nouvelles ambitions⁵¹³. L'adresse introductive et générale de Melvin Klerer, intitulée « Interactive programming and automated mathematics », est tout à fait emblématique de cet état d'esprit :

*[...] questions as to the value of the experimental approach toward mathematics are an entirely different matter. The present state-of-the-art is so scant in empirical or theoretical guidelines that this approach must be acknowledged as an expression of faith that a computer, used to explore ill-defined mathematical constructs and problems, might yield powerful insights and a fruitful methodology.*⁵¹⁴

Cette adresse résonne avec le projet NAPSS (Numerical Analysis Problem Solving System) porté par John Rice et Saul Rosen à l'Université de Purdue. Dans le même symposium de 1967, John Rice rappelle l'ambition qui anime les projets de ce type : « Our aim is to make the computer behave as if it had some of the knowledge, ability and insight of a professional numerical analyst »⁵¹⁵. Mais l'ambition restera contrariée par la puissance réduite des ordinateurs du moment.

À la fin des années 1960, l'intérêt pour les « mathematical softwares » se cristallise dans la réunion ACM SIGNUM (Special Interest group on Numerical mathematics). John Rice, avec l'appui de cette communauté et le financement du SIGNUM et de l'ONR (Office of Naval Research), organise l'évènement fondateur, pour beaucoup des acteurs présents à ce moment-là, d'une communauté experte : le Symposium « Mathematical Software » à l'Université de Purdue en avril 1970⁵¹⁶. John Rice⁵¹⁷ prend une place centrale dans cette communauté, animée bientôt par la revue *ACM-Transactions on Mathematical Software (TOMS)*.

4. Des PACKs à MatLab : exemple de la trajectoire scientifique de Cleve Moler

Le sujet de la création de bibliothèques de routines logicielles mathématiques devient une préoccupation grandissante au sein de la communauté de l'analyse numérique. À la faveur des années 1970 et des générations d'ordinateurs plus puissants, un des premiers packages largement diffusé et utilisé est EISPACK, créé au sein du Argonne National Laboratory aux

bibliothèque de routines, se trouve dans le traité très influent de M. Wilkes, D. Wheeler, et S. Gill, publié en 1951 et associé à la machine EDSAC de Cambridge (GB) : *The preparation of programs for an electronic digital computer: with special reference to the EDSAC and the use of a library of subroutines* (Maurice V. Wilkes, Wheeler et Gill 1951). Le constructeur IBM donnera une autre ampleur à ce partage pour la conception logicielle. IBM met en place SHARE et SSP (Scientific Software Package) au sein de la communauté des utilisateurs de machines IBM. L'effort collaboratif et de partage est systématisé par des outils d'échanges non pas numériques, mais « papiers », offrant une infrastructure que seul le géant IBM peut se permettre d'organiser et de financer. Voir (Haigh 2017).

⁵¹³ Les comptes-rendus sont publiés la même année : (Klerer et Reinfelds (eds.) 1967).

⁵¹⁴ (*Ibid.*, p. 3).

⁵¹⁵ (Rice 1967).

⁵¹⁶ Il sera suivi par deux autres symposium, structurant de la communauté en 1974 et 1977.

⁵¹⁷ Formé aux mathématiques, docteur en mathématiques en 1959 du célèbre CalTech (California Institute of Technology), il entame une carrière académique au NBS (dans le petit groupe sur l'analyse numérique), puis passe quatre ans chez General Motors. Chez GM, dans un groupe de mathématiciens bénéficiant d'une certaine liberté de travail et de choix de leurs orientations de recherche. Il retrouve le monde académique en 1964 à l'Université de Purdue. Son parcours jusque-là le forme aux mathématiques appliquées, à la programmation en langages de haut niveau (dont Fortran, évidemment) et l'implique dans la vaste communauté SHARE du constructeur IBM.

États-Unis, vers 1972⁵¹⁸. EISPACK est une bibliothèque Fortran qui implémente les algorithmes de calcul de valeurs propres de matrices⁵¹⁹.

Ces PACKs auront un effet de standardisation très important : EISPACK détermine un modèle de « mathematical software » transposable dans différents systèmes informatiques, rigoureusement testés sur ces ordinateurs. Ces PACKs ont servi massivement dans le calcul scientifique intensif sur les supercalculateurs des années 1980-1990. Cleve Moler, un membre de l'équipe d'Argonne, élabore une version simplifiée et plus autonome des packages, à la fin des années 1970 : MatLab. Dédié au calcul matriciel, il propose un environnement spécifique et interactif pour le calcul, détaché des contraintes et lourdeurs de la programmation en Fortran. Nouvelle ergonomie, nouveaux usages, Matlab ouvre un chapitre du développement et de l'exploitation commerciale des « mathematical softwares ».

Tout cette évolution indique une des voies par lesquelles les mathématiques sont mises en « boîte noire » et diffusées très largement. L'objectif de donner accès au plus grand nombre est en quelque sorte réalisé grâce à l'interactivité et la mise à distance entre l'utilisateur et les complexités mathématiques et algorithmiques au cœur du système. C'est une sorte de constante de l'histoire des instruments mathématiques contemporains. L'avènement du micro-ordinateur post-IBM PC offrira la possibilité technique et commerciale d'une exploitation élargie : tout scientifique ou ingénieur qui le souhaite peut acheter et disposer de cet ensemble d'outils taillés sur mesure pour la recherche.

Cependant, MatLab n'est qu'un produit dérivé de la dynamique qui se construit autour des « mathematical softwares ». Après la phase très exploratoire des premiers PACKs, la communauté vise à élaborer une recherche de haut niveau avec une méthodologie reconnue. L'espoir de systématiser la construction de ces logiciels va de pair avec l'effort pour construire un champ de recherche qui se veut légitime.

Les acteurs institutionnels comme l'Argonne National Laboratory et le National Institute of Standards and Technology sont partie prenante de cette dynamique. Obtenir le soutien de sociétés savantes s'est avéré plus complexe, car la communauté oscille entre ACM (Association for Computer machinery) et SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics). Cela cache des débats épistémologiques et politiques importants, liés au positionnement interdisciplinaire des recherches sur les « mathematical softwares », entre les computer sciences et l'analyse numérique⁵²⁰.

⁵¹⁸ (Moler et Dongarra 1984).

⁵¹⁹ L'algorithme a été défini préalablement par Jim Wilkinson et implémenté dans un autre langage de référence, Algol, par Wilkinson et Reinsch (Wilkinson et Reinsch 1971). Les PACKs sont des travaux de quelques pionniers autant que le signe d'une implication institutionnelle importante et d'un besoin partagé dans la communauté. L'effort se poursuit avec un second package LINPACK pour les opérations de l'algèbre linéaire. Rice est associé à une autre PACK très ambitieux, ELLPACK pour les équations aux dérivées partielles elliptiques.

⁵²⁰ Ces débats font écho aux difficultés de la disciplinarisation de l'informatique, prise entre une revendication d'autonomie des informaticiens, et un dénigrement d'une partie des mathématiciens. Concernant les « mathematical softwares » l'opposition au sein de l'association SIAM se cristallise sur le manque de profondeur « mathématique » dans ces recherches, voyant surtout son côté « logiciel ». Finalement ACM reste le giron et le havre des « mathematical softwares », éditant les *ACM-TOMS* à partir de 1975, avec John Rice comme rédacteur en chef.

5. Pour une histoire et une épistémologie des « mathematical softwares »

Les recherches sur les « mathematical softwares » sont le résultat d'hybridations de recherches mathématiques et informatiques, auxquelles les concepteurs empruntent des concepts, des principes, des méthodologies et des pratiques. Dans les interstices de disciplines plus établies, la communauté de recherche s'active pour fonder sa légitimité scientifique. La revue *ACM-Transactions on Mathematical Software* après 1975 est un moyen d'échanges et d'organisation de cette communauté : c'est aussi un vecteur de publications scientifiques des recherches sur les instruments mathématiques, qui n'existe pas ailleurs, donc un moyen de donner un crédit académique aux chercheurs impliqués. Entre publications et colloques, la communauté tente de stabiliser ses méthodes et ses pratiques de développement d'instruments mathématiques. Il reste néanmoins que le processus socio-historique de construction de cette communauté, les controverses avec les disciplines frontières, les moyens mis en œuvre pour assurer sa légitimité académique au-delà de la revue, tout cela est très mal connu.

D'un point de vue plus technique, l'élaboration des « mathematical softwares » englobe plusieurs problématiques de recherche et développement :

- développement d'algorithmes, en particulier ceux associés à des problèmes mathématiques qu'on trouve dans de nombreuses applications ;
- l'implémentation pratique des algorithmes sur les systèmes de calcul : ce qui signifie étudier les interactions avec les différentes architectures matérielles et logicielles des ordinateurs ;
- l'évaluation et le test des logiciels, incluant les méthodologies, les outils, les plateformes ;
- le génie logiciel pour l'élaboration des « mathematical softwares » et des interfaces utilisateurs qui sont déterminantes pour un usage efficace ;
- la dissémination et la maintenance des logiciels, étant donné le foisonnement de systèmes informatiques et leur obsolescence rapide.

Ces recherches se nourrissent d'une longue histoire d'optimisation contrainte des logiciels conçus pour des systèmes informatiques en perpétuelle évolution. Les artefacts matériels changent, leur mode d'instrumentation aussi. Les développements réutilisent au maximum les codes et programmes déjà écrits et misent sur une grande modularité dans la conception logicielle. Enfin, les concepteurs manifestent un grand souci de l'utilisateur : d'une part, ils soignent l'ergonomie de l'interface utilisateur ; d'autre part, ils veillent à ce que l'utilisateur commande le logiciel avec un niveau de langage élevé, c'est-à-dire offrant la possibilité d'exprimer le problème à résoudre au plus proche des termes du métier de l'utilisateur.

En un sens, le développement des « mathematical softwares » renoue avec le côté expérimental des débuts de l'informatique : il est confronté à la mise en adéquation de méthodes mathématiques avec toute la matérialité de l'artefact. La recherche sur les « mathematical softwares » passe par une épreuve nécessaire de mise en situation réelle, c'est-à-dire sur l'ordinateur. Comprendre le logiciel qui est créé passe par le test et l'expérimentation sur la machine réelle, avec toutes les contraintes de sa matérialité : une machine produit du bruit et des erreurs de calcul, fonctionne de manière approchée, ne peut fonctionner qu'avec des procédures finies. Qui plus est, il n'existe pas « une » machine mais une multitude d'architectures d'ordinateurs, donc de situations nouvelles et réelles à tester. Ce dernier point

concerne tout le travail de portabilité des « mathematical softwares », qui est considéré comme capital depuis la création des PACKs.

Les algorithmes doivent être corrects d'un point de vue strictement mathématique, mais aussi et surtout être capables de gérer l'accumulation d'approximations, ou en tout cas ne pas faillir quand des anomalies surgissent dans les calculs. En outre, les approximations se situent à tous les niveaux : de la simple intégrale (approchée par des sommes discrètes), aux courbes (approchées par des lignes polygonales), en passant par des fonctions compliquées et les séries infinies : les approximations résultent de la finitude de la machine face aux procédures et méthodes mathématiques valables lorsqu'elles approchent l'infini. Le résultat d'un « mathematical software » est toujours une approximation finie, résultat d'une troncature. Les chercheurs et concepteurs veillent à ce que ce résultat soit une « bonne » approximation. Depuis les années 1980 l'enjeu est que le « mathematical software » puisse donner un indicateur de la qualité de ces approximations et alerter l'utilisateur quand le résultat est suspect ; il peut embarquer un système de contrôle du niveau d'approximation pour adapter au mieux l'algorithme à un problème mathématique donné. Avec l'élaboration des « mathematical softwares » les enjeux dépassent en fait l'exigence qui existait déjà antérieurement, et de longue date, avec tous les instruments mathématiques. L'émergence et le déploiement de ces « mathematical softwares », devenus un mode d'instrumentation des mathématiques pour un grand nombre de domaines scientifiques et techniques, doivent désormais faire l'objet d'une analyse socio-historique et épistémologique d'ampleur, pour avancer dans la compréhension de la fabrique des instruments mathématiques contemporains.

D. Les mathématiques comme instrument ?

1. « Instrumentation » et « instrumentalisation » des mathématiques

Pour terminer cette partie et clore ce mémoire, il convient de poser à nouveau la question : peut-on considérer les mathématiques « comme instrument » ? Cette question intègre au moins trois interrogations :

- qu'est-ce qui en fait un instrument ? et donc quels seraient les processus d'instrumentation de savoirs mathématiques ?
- de quelle manière sont élaborés ou transformés des savoirs mathématiques au cours d'une telle instrumentation ? autrement dit, dans les termes de Rabardel, quels seraient les processus d'instrumentalisation des mathématiques ?
- quelles fonctions instrumentales les mathématiques peuvent-elles opérer ?

Comme ensemble de savoirs mathématiques, l'analyse de Fourier est apparue dans un double processus d'instrumentation et d'instrumentalisation, entretenu sur toute sa longue histoire. L'analyse spéciale est conçue et instrumentée par Joseph Fourier pour répondre à des problèmes de la physique, jusque dans les détails des évaluations numériques finales. L'analyse de Fourier est instrumentée pour les différents instruments de Fourier dont nous avons esquissé l'histoire. Nous avons ébauché la lente instrumentalisation qui en est le symétrique, en pointant les modalités de la généralisation de l'analyse de Fourier, même si ce n'est qu'une trame qu'il faudra approfondir. Dans ce processus, les interactions de Norbert Wiener avec les physiciens et les ingénieurs a été décisive pour sa « generalized harmonic analysis ». Cela était déjà vrai pour la théorisation de la turbulence, du mouvement brownien et de l'optique. Le processus a évidemment une dimension sociale très forte et la figure très centrale de Wiener ne doit pas

l'occulter. Ces allers-retours de Wiener entre les mathématiques et les problèmes concrets sont une illustration très remarquable du double processus d'instrumentation et d'instrumentalisation des mathématiques.

En brossant le portrait de la fabrique des instruments de Fourier, nous avons croisé d'autres processus d'instrumentation et d'instrumentalisation des mathématiques. La théorie des distributions de Laurent Schwartz entretient des rapports historiques connus avec les travaux d'Heaviside et de Dirac : la création mathématique des distributions, leur parachèvement par Schwartz est un moment intense d'instrumentalisation des mathématiques⁵²¹. Progressivement, les distributions se substituent aux notions élaborées par les physiciens, en amplifiant même leur caractère opératoire. Les distributions sont instrumentées pour la théorie quantique des champs après 1950 et pour l'instrumentation scientifique dans son ensemble, nous en avons vu les conséquences. Schwartz en est un acteur, il en est le premier promoteur et médiateur, dans ses traités et ses conférences. L'ouvrage de Jacques Arsac est nourri de ces théories des distributions, et relance encore l'instrumentalisation de ce corpus de savoirs. Appropriation, diffusion, réinterprétation, tous ces mécanismes sont autant épistémologiques que sociaux.

La conjugaison des processus d'instrumentation et d'instrumentalisation se retrouve dans de multiples situations au 20^{ème} siècle, certaines viennent immédiatement à l'esprit. Dans le domaine de la mécanique des fluides et de la turbulence, physiciens et mathématiciens forgent leurs instruments mathématiques dès le début du siècle. Dans les théories de la communication, Shannon et Wiener, dans les années 1940, introduisent une perspective statistique et bouleversent les modes d'instrumentation avec ce qui est couramment appelé la théorie de l'information. La liste de ces situations est longue : le traitement du signal, la théorie des jeux, la recherche opérationnelle, l'analyse numérique, les théories du contrôle, etc. Les mathématiques font partie de la panoplie des instruments dans tous ces domaines. Il n'est évidemment pas le seul instrument et il est, comme les autres, façonné au besoin, adapté aux contraintes, retouché, développé pour un usage pratique et concret. Il est simultanément épuré, davantage formalisé, il permet d'initier de nouvelles recherches mathématiques, de générer de nouveaux savoirs mathématiques.

Parmi les modalités de cette instrumentation se trouve la modélisation puisque les mathématiques ont représenté le moyen de formalisation de modèles le plus important au 20^{ème} siècle. Les pratiques de modélisation sont tellement diversifiées au fil du siècle qu'il est difficile d'en parler en termes généraux, même si les fonctions assurées par une modélisation restent en nombre limité⁵²². Si pendant un temps les modèles mathématiques ont été restreints à l'utilisation d'un seul instrument mathématique, typiquement les équations différentielles, le 20^{ème} siècle est traversé par les inventions de nouveaux instruments pour la modélisation, comme la notion de jeu – voir ci-dessous. La simulation informatique a étendu les possibilités d'entrecroisements de ces formalismes dans des modèles pluriformalisés⁵²³.

⁵²¹ (Lützen 1982; Paumier 2014; Paumier 2016).

⁵²² Les comptes-rendus du Workshop à la MFO-Oberwolfach organisé en octobre 2015 sur le thème « History of Mathematics: Models and Visualization in the Mathematical and Physical Sciences » nous montrent l'extension considérable des recherches sur le sujet.

⁵²³ Nous reprenons les termes de (Varenne 2007).

Mais avant l'ère informatique les modèles sont déjà complexes, et ils peuvent faire coexister ou superposer de multiples épaisseurs formelles et matérielles. Les exemples analysés par Dominique Tournès au sujet des modélisations des aurores boréales et des rayons cosmiques, sur la longue période 1850-1950 sont des cas d'école⁵²⁴. Le modèle global du phénomène physique sur lequel il devient possible de calculer et raisonner est un système constitué de plusieurs modèles mathématiques, de modèles numériques, de simulations analogiques impliquant l'analyseur différentiel de V. Bush lui-même interprété comme modèle mécanique analogique des équations en jeu.

Pour illustrer cette question de la modélisation et le rapport à l'instrumentalisation des mathématiques nous ne donnerons qu'un exemple rapide, tiré de l'ouvrage de von Neumann et Morgenstern de 1944 *Theory of games and economic behavior*. L'ouvrage est important au regard de l'histoire de la théorie mathématique des jeux et il débute par un liminaire épistémologique sur les modèles employés en théorie économique et leur élaboration. Les auteurs écrivent :

For economic and social problems the games fulfill – or should fulfill – the same function which various geometrico-mathematical models have successfully performed in the physical sciences. Such models are theoretical constructs with a precise, exhaustive and not too complicated definition; and they must be similar to reality in those respects which are essential in the investigation at hand. To recapitulate in detail: The definition must be precise and exhaustive in order to make a mathematical treatment possible. The construct must not be unduly complicated, so that the mathematical treatment can be brought beyond the mere formalism to the point where it yields complete numerical results.

En d'autres termes, le modèle du jeu, et la théorie des jeux, seront des instruments à adapter pour assurer une formalisation de l'activité des acteurs économiques.

Reste la question des fonctions instrumentales opérables par les mathématiques, sur laquelle il est bien difficile d'être exhaustif et de proposer une typologie générale. À la lumière de ce que nous avons exploré, les fonctions instrumentales vont de fonctions classiques de théorisation, formalisation, modélisation à des fonctions de facilitation d'interprétation, de représentation géométrique, de médiation entre des résultats empiriques et des théories, ou encore d'orientation pour la mise en œuvre d'une instrumentation scientifique. Chacune de ces fonctions devrait être détaillée, précisée. Ainsi la formalisation recouvre la géométrisation ou encore l'axiomatisation : si l'arithmétique et les théories des probabilités ont été axiomatisées dans le cadre interne des mathématiques, la méthode axiomatique est sortie du périmètre des mathématiques au 20^{ème} siècle. La mécanique quantique commence à être axiomatisée dans les années 1930 et les efforts d'axiomatisation en théorie économique, initiée par von Neumann et Morgenstern, sont postérieurs à la seconde guerre mondiale⁵²⁵. Une classification de ces fonctions est un horizon de recherche, mais beaucoup trop vaste pour ce mémoire et elle demanderait à être nourrie de cas d'études plus nombreux.

2. Le mode de pensée des praticiens des mathématiques

Penser les mathématiques comme instrument, ce n'est pas nouveau en soi, nous l'avons indiqué. L'histoire de l'astronomie est marquée par les pratiques mathématiques

⁵²⁴ Nous nous référons à sa contribution dans le Workshop indiqué précédemment « Models and visual thinking in physical applications of differential equation theory: three case studies during the period 1850–1950 (Bashforth, Størmer, Lemaître) », (Tournès 2015).

⁵²⁵ Voir par exemple (Mongin 2003).

instrumentales. Les mathématiques font partie de la panoplie des instruments des observatoires, mais aussi de la balistique, de l'ingénierie civile et militaire, de la géodésie et de la topographie, de la conception navale, etc. Rien ne se dément au 20^{ème} siècle, malgré la montée en formalisme et en abstraction dans les mathématiques. Nous n'introduisons pas une perspective épistémologique artificielle au regard de cette histoire. Les acteurs eux-mêmes, les praticiens des mathématiques qui se sont retrouvés sur le devant de notre scène, en sont les meilleurs porte-paroles : dans leur épistémologie très empiriste des mathématiques, dans leurs pratiques mathématiques, dans les écrits et discours qu'ils ont pu formuler sur le sujet. Nous avons donné l'exemple des rapports de Wiener à la physique et l'ingénierie. Le célèbre texte de V. Bush, collègue de Wiener au MIT, « Instrumental analysis », publié en 1936, est un phare de ce mode de pensée.

The use of instruments of computation and analysis is as old as mathematics itself. [...] There have always been such aids to reasoning, and the development of instrumental methods has throughout proceeded in parallel with formal methods. [...] The instrument, whatever it may be, has two functions: first, when approximate results are sufficient, to yield these directly; second, as a suggestive auxiliary to precise reasoning.

*It is the purpose of this paper to suggest that formal mathematics may again be influenced by instrumental development, and that there would be mutual benefit if the gulf between them were less wide.*⁵²⁶

Le célèbre texte de von Neumann de 1947 « The mathematician » est un manifeste pour une pratique des mathématiques, renouant avec des sources empiriques⁵²⁷. Les ingénieurs-mathématiciens Vogel et Minorsky ont répété en de nombreuses occasions les rapports nécessaires que doivent entretenir les mathématiques avec la physique et les pratiques des ingénieurs⁵²⁸. Le spécialiste de la mécanique des fluides, Théodore von Karman, a écrit deux textes particulièrement évocateurs, adressés autant aux mathématiciens qu'aux ingénieurs : « The engineer grapples with nonlinear problems » de 1940 et « Tooling up mathematics for engineering » en 1943. Le premier recense les efforts des physiciens, ingénieurs et mathématiciens sur tous les problèmes non linéaires connus et rencontrés en pratique en 1939. Il récapitule les efforts d'instrumentation et d'instrumentalisation des mathématiques, le premier chapitre étant celui des théories des oscillations non linéaires. Von Karman conclut par un appel aux mathématiciens : « I would consider this lecture a great success if it would induce

⁵²⁶ (V. Bush 1936, p. 649-651)

⁵²⁷ « I think that it is a relatively good approximation to truth - which is much too complicated to allow anything but approximations-that mathematical ideas originate in empirics, although the genealogy is sometimes long and obscure [...] At a great distance from its empirical source, or after much 'abstract' inbreeding, a mathematical subject is in danger of degeneration. At the inception the style is usually classical; when it shows signs of becoming baroque, then the danger signal is up. ...Whenever this stage is reached, the only remedy seems to me to be the rejuvenating return to the source: the reinjection of more or less empirical ideas. I am convinced that this was a necessary condition to conserve the freshness and the vitality of the subject and that this will remain equally true in the future. » (John von Neumann 1947).

⁵²⁸ « In recent times the gap between the mathematician and the engineer grew wider. Not every discovery in mathematics is immediately useful to the engineer, and, conversely, not every problem of interest to the engineer can be answered by the mathematician. [...] On the other hand, whenever contacts between mathematics and applied science occur, they are generally useful to both. [...] It cannot be denied that mathematics, at least in the early stages of its development, received a beneficial stimulus from some kind of physical « images ». [...] Viewed from this standpoint a systematic study of analogues may not only bridge the gaps separating the mathematician and the engineer but may, in some cases, orient a purely analytical argument as well. » (Minorsky 1947, p. 148-149).

mathematicians to volunteer for pioneering work in pushing those frontiers "farther west" »⁵²⁹. Le second texte, beaucoup plus court, met en scène un dialogue entre un mathématicien et un ingénieur, partageant leur expérience des rapports à la recherche en mathématiques et ses « applications », pour parvenir à un consensus :

The engineer - [...] the engineer has to go into the fundamentals of analysis to a considerable depth in order to use the mathematical tools properly. An arbitrary assembly of machine tools does not constitute an efficient machine shop. We know there are powerful machine tools in your mathematical arsenal. The task before us is to know how to adapt and apply them.

*The mathematician-. I think you've got something there. To carry your analogy further, in order to get the solution of engineering problems into production, you need some kind of tool designers. These are the real applied mathematicians. Their original backgrounds may differ; they may come from pure mathematics, from physics or from engineering, but their common aim is to "tool up" mathematics for engineering.*⁵³⁰

« Tooling up mathematics » ce n'est rien d'autre que le processus d'instrumentation des mathématiques.

3. Questionner la dichotomie « pur » vs « appliqué »

Au-delà de la caractérisation de ce besoin, Von Karman indique aussi que le rôle de « tool designer » est dévolu au « real applied mathematician », catégorie qu'il crée de manière *ad hoc*. Cette catégorie s'imisce dans la dichotomie entre mathématiques pures et appliquées, qu'on sent à la fois inconfortable et impropre à qualifier la réalité de la pratique mathématique. C'est un point qu'on retrouverait chez tous ces praticiens des mathématiques, sous une forme ou une autre, qui ne se satisfont pas d'une distinction trop stricte entre pur et appliqué.

Ces distinctions sont avant tout sociales et institutionnelles, elles ont fait l'objet de controverses depuis le 19^{ème} siècle. Elles sont historiographiquement difficiles à utiliser, d'autant plus que ces distinctions fluctuent dans le temps et d'un contexte à l'autre, il faudrait préciser à chaque fois le sens à donner à cette « pureté » et la nature de l'application. Les formes varient déjà au 19^{ème} siècle depuis la pensée physico-mathématique de Fourier jusqu'aux réformes engagées par le mathématicien Felix Klein à l'Université de Göttingen : von Karman a d'ailleurs été formé chez Ludwig Prandtl à Göttingen, dans cette culture d'ingénieurs-scientifiques et d'ingénieurs-mathématiciens. C'est probablement ce à quoi fait référence von Karman avec son « real applied mathematician ». L'institutionnalisation des mathématiques appliquées au 20^{ème} siècle est émaillée de débats récurrents, allant jusqu'à des positions très tranchées et provocatrices comme celles du mathématicien Vladimir Arnold qui déclarait en 1998, entre ironie et sévérité, à propos des mathématiques voulues trop « abstraites » :

*Mathematics is a part of physics. Physics is an experimental science, a part of natural science. Mathematics is the part of physics where experiments are cheap. [...] Attempts to create "pure" deductive-axiomatic mathematics have led to the rejection of the scheme used in physics (observation, model, investigation of the model, conclusions, testing by observations) and its replacement by the scheme definition, theorem, proof. It is impossible to understand an unmotivated definition but this does not stop the criminal algebraist-axiomatizers*⁵³¹.

⁵²⁹ (von Karman 1940, p. 675). Le texte est tiré de sa conférence « Josiah Willard Gibbs Lecture » du 27 décembre 1939, délivré sous les auspices de l'American Mathematical Society et l'American Association for the Advancement of Science.

⁵³⁰ (von Karman 1943, p. 6).

⁵³¹ (Arnold 1998).

Nous nous sommes efforcés de minimiser l'utilisation de cette dichotomie au fil de ce mémoire. Notre interprétation en termes de processus d'instrumentation et d'instrumentalisation des mathématiques invite, nous semble-t-il, à mettre de côté cette dichotomie. Ce double processus rend compte des interactions des mathématiques avec les autres domaines du savoir, il met même spécifiquement l'accent sur ces interactions comme moteur d'une dynamique d'élaboration de nouveaux savoirs. Il permet en outre de ne pas séparer le corpus des savoirs mathématiques en catégories *a priori*. Somme toute ce qui relèverait des mathématiques dites « pures » a, bien évidemment, sa place au titre de recherche avancée de formalismes et de concepts, constituant autant de nouveaux artefacts possiblement instrumentables. La dynamique des savoirs mathématiques combine les jeux de la création théorique, formelle et abstraite, et la recherche de solutions à des problèmes pratiques et concrets. Tout cela fait écho au rapport publié par la National Science Foundation en 1998 sur la place des mathématiques américaines dans le monde⁵³² qui affirmait : « Nowadays all mathematics is being applied, so the term applied mathematics should be viewed as a different cross cut of the discipline ».

4. Les traités, des moyens d'instrumentation des mathématiques ?

Qu'il s'agisse d'application ou d'instrumentation des mathématiques, ces processus ont jusqu'ici été abordés uniquement en termes d'acteurs, individuels ou collectifs. Mais nous avons vu apparaître régulièrement une sorte d'intermédiaire, de médiateur de cette instrumentation sous la forme des traités de mathématiques à destination des physiciens et des ingénieurs. Le « Courant-Hilbert » écrit en 1924 en allemand, *Methoden der mathematischen Physik*, et traduit en 1937 en anglais, compte parmi les plus importants traités de l'entre-deux-guerres par sa diffusion et son influence. Avec les mises à jour par Richard Courant jusque dans les années 1960, il s'est installé comme traité de référence du 20^{ème} siècle en physique-mathématique, le *vade-mecum* de plusieurs générations de physiciens. Quelle est l'ambition initiale des auteurs ? Il s'agit de résoudre un problème de disjonction culturelle entre mathématiciens et physiciens, raison pour laquelle le « Courant-Hilbert » n'est pas un simple catalogue de recettes, ni un formulaire, ni une table de résultats, ni un outil à utiliser sans réflexion. Il est une traduction, une médiation, une pré-instrumentation des mathématiques, écrit dans des termes accessibles pour les physiciens et les ingénieurs. La genèse du traité, le contexte dans lequel il a été écrit, la culture mathématique et physique de l'Université de Göttingen sont connus et ont été discutés à plusieurs reprises⁵³³.

La décennie 1920 est aussi la période de pleine effervescence et d'émergence des nouvelles théories physiques : Werner Heisenberg, Max Born et Pascual Jordan élaborent la mécanique matricielle (1925), Erwin Schrödinger la mécanique ondulatoire (1926). Les travaux mathématiques qui ont nourri et qui ont été mis en ordre d'opération dans le traité fournissent des instruments mathématiques pour ces nouvelles théories physiques. Arthur Patterson, quand il est en Allemagne dans ces mêmes années, se familiarise avec la mécanique quantique, la cristallographie et la transformée de Fourier, par l'intermédiaire de ce traité qui lui fournit le langage de l'analyse harmonique héritée du 19^{ème} siècle. Il aura l'occasion d'actualiser son approche de l'analyse harmonique par la suite, en discussion avec Wiener.

⁵³² « Report of the senior assessment panel for the international assessment of the U.S. mathematical sciences », NSF, mars 1998. [URL : <https://www.nsf.gov/pubs/1998/nsf9895/nsf9895.pdf> consulté le 7/05/1998]. Il est cité dans (Siegmond-Schultze et Barrow-Green 2015).

⁵³³ L'ouvrage de Constance Reid inclut en outre une biographie des deux auteurs (Reid 1986).

Si le « Courant-Hilbert » est resté un traité emblématique, il n'est certainement pas le seul à avoir assuré une fonction de pré-instrumentation des mathématiques. La série des traités de Laurent Schwartz intitulés *Les méthodes mathématiques de la physique*, l'ouvrage de Jacques Arsac *Transformation de Fourier et théorie des distributions* et son pendant en langue anglaise *The Fourier transform and its applications* de Ronald Bracewell, se rangent dans cette catégorie. On peut encore ajouter l'ouvrage *Théorie des fonctions aléatoires* très important dans le domaine du traitement du signal, pour les physiciens et les ingénieurs, publié par André Blanc-Lapierre et Robert Foret, avec un chapitre par ailleurs consacré à la mécanique des fluides écrit par un des meilleurs théoriciens français, Joseph Kampé de Fériet.

Ce ne sont que quelques traités rencontrés dans ce mémoire, ce qui n'a absolument rien d'exhaustif de l'étendue de ce mode de pré-instrumentation des mathématiques. Leur fonction de circulation et de percolation des savoirs mathématiques est constitutive de l'exercice d'écriture de ces traités. Mais il s'agit bien d'une réécriture des savoirs mathématiques puisqu'ils ont été retravaillés dans la perspective d'utilisations nouvelles de ces mathématiques. Ce sont des traités de mathématiques pour la physique, de mathématiques pour l'ingénieur qui se rangent dans une catégorie adjacente des mathématiques appliquées, au sens de la discipline qui se dessine au 20^{ème} siècle. Il faudrait pouvoir rassembler de manière plus systématique cette littérature, mettre en comparaison les contenus des traités et cerner les modes d'écriture, les propositions d'interprétation, les ambitions, les différents styles et cultures scientifiques qui s'expriment par ce biais. Cela permettrait également de savoir quels effets un tel traitement a pu avoir sur les savoirs mathématiques eux-mêmes.

Pour alimenter ces réflexions, il nous semble indispensable de nous en référer aux travaux de Frédéric Brechenmacher sur l'histoire de l'algèbre linéaire et de l'émergence, à l'échelle internationale, de la théorie des matrices, essentiellement dans les années 1920-1930⁵³⁴. Les modalités de cette émergence sont complexes. Elle peut s'inscrire dans les processus de standardisation qui suivent la première guerre mondiale, impliquant jusqu'aux savoirs mathématiques. Elle articule un global de l'internationalisation des mathématiques, avec des effets de cultures mathématiques locales, entre l'Allemagne, la France et les États-Unis en particulier. La mécanique matricielle, à partir de 1925, est un facteur d'accélération de l'intérêt porté au sujet des matrices. La théorie des matrices devient progressivement un chapitre préliminaire des traités à destination des physiciens et des ingénieurs, à l'écriture standardisée. Le savoir mathématique est organisé, préparé, orienté pour ces domaines, avec des objectifs pratiques et des méthodes effectives, ce qu'on ne trouve pas dans les traités adressés aux seuls mathématiciens. Le premier chapitre du « Courant-Hilbert » est d'ailleurs consacré à l'algèbre linéaire et aux matrices. Dans les termes qui sont les nôtres, il nous semble que l'émergence de la théorie des matrices indique un double processus d'instrumentation et d'instrumentalisation : une (pré-)instrumentation par l'écriture des traités pour la physique et l'ingénierie ; et une instrumentalisation renouvelée des savoirs mathématiques sur les matrices qui découle de l'intérêt grandissant dans un vaste champ qui va de la mécanique à la mécanique quantique et à l'ingénierie électrique.

⁵³⁴ (Brechenmacher 2010). Nous nous appuyons également sur ses interventions dans le Workshop du CIRM « Les communautés mathématiques dans la reconstruction de l'après-guerre (1918-1928) » et au séminaire d'Histoire des mathématiques de l'IHP du 22 mars 2019 sur « La standardisation de la théorie des matrices dans l'Entre-deux-guerres ».

5. Les mathématiques, instrument de la rationalisation de l'action ?

Ces processus d'instrumentation et de standardisation nous rappellent immanquablement l'univers industriel. Ce qui n'a rien d'un hasard puisqu'ils nous renvoient aux manières dont sont produits les savoirs scientifiques et techniques au 20^{ème} siècle. La fabrique des savoirs mathématiques au siècle des technosciences n'échappe pas à la règle : organisation, spécialisation, standardisation, inscription dans des régimes de production de savoirs successifs, de ce point de vue les savoirs mathématiques sont des savoirs comme les autres.

Instrumentation et standardisation sont également les deux facettes de l'émergence des mathématiques industrielles, domaine dans lequel il s'agit d'élaborer des méthodes et des instruments mathématiques pour rationaliser, massifier et standardiser la production industrielle, au 20^{ème} siècle. Les statistiques ont la part belle dans la modernisation du contrôle de qualité et la normalisation, en Allemagne avec Iris Runge, aux Etats-Unis aux Bell Labs, ce sont les contextes les mieux documentés. D'autres firmes comme Philipps, AEG, General Electric, Siemens ont leurs laboratoires mathématiques également. Ces mathématiques industrielles correspondent à un vaste mouvement de rationalisation de la production inscrit dans l'essor de la civilisation de masse⁵³⁵. Les racines se situent avant 1914, la première guerre mondiale a intensifié les besoins puis cette rationalisation est devenue un mot d'ordre des années 1920 aux années 1950 dans le monde technique et industriel.

Les historiens des mathématiques ont souligné à quel point le renouveau des mathématiques appliquées après la seconde guerre mondiale est lié à l'amplification de ces projets de rationalisation de l'action, qu'elle soit de l'ordre militaire, de la production industrielle ou de l'organisation sociale⁵³⁶. Développement accru de la modélisation mathématique, conjuguée avec l'émergence des technologies informatiques, tels sont les catalyseurs et les meilleurs instruments génériques de cette dynamique après la guerre. Elle se fait sous influence américaine, et c'est déjà durant le second conflit mondial que ces pratiques mathématiques ont été expérimentées. Après-guerre les nouveaux lieux émergents que sont les *think tank* modifient les modes de fabrication de ces instruments mathématiques. Le plus emblématique d'entre eux est certainement la Rand Corporation. Les nouveaux pans du savoir mathématique et nouveaux instruments orientés pour l'action s'appellent : théorie des jeux, recherche opérationnelle, théorie des systèmes, programmation linéaire, théorie de la décision, etc. Ils sont consubstantiels des projets technoscientifiques du siècle qui embarquent tout le corps social.

Au 21^{ème} siècle, ces savoirs et méthodes mathématiques s'incarnent dans nos ordinateurs, ils ont été invisibilisés, miniaturisés par le truchement de la microélectronique et du développement des algorithmes. Les « mathematical softwares » sont des instruments utilisés largement dans les activités scientifiques et techniques. Or, dans la plupart de ces logiciels propriétaires, les algorithmes mathématiques et les modes de programmation ont été eux-aussi rendus invisibles aux utilisateurs : l'encapsulation des mathématiques est gage d'efficacité et d'économie de production mais dépossède l'utilisateur d'un certain nombre de savoirs et de compétences associées.

⁵³⁵ Pour reprendre les termes de François Caron et tout particulièrement ceux de son ouvrage *Les deux révolutions industrielles du XXe siècle* (Caron 1998).

⁵³⁶ Voir toujours (Siegmond-Schultze et Barrow-Green 2015; Dahan 2005; Dahan Dalmedico 1996).

Les transformations électroniques et mathématiques des instruments que nous avons suivies dans les années 1970 semblent en quelque sorte préparer l'évolution plus générale des instruments de tous ordres, des systèmes embarqués, enfouis, miniaturisés et invisibilisés jusque dans nos objets du quotidien. En effet, Micral est un instrument automatisé qui étend le domaine de l'expérience agronomique en étant plus fiable et plus économique que l'existant. La spectrométrie FTIR en phase de miniaturisation dans les années 1970, envahit les laboratoires du monde entier avec des instruments standardisés dans les décennies qui suivent. La FFT est un incontournable de tout le traitement du signal, relayée et amplifiée par les méthodes à ondelettes. C'est ce qui a permis à la fois le développement sans précédent de l'astrophysique, de la radioastronomie à la découverte récente des ondes gravitationnelles, et le développement des technologies Wifi de notre quotidien.

Il en ressort que les mathématiques encapsulées dans les artefacts semblent un facteur devenu primordial de l'extension du domaine de l'expérience, de la fiabilisation des instruments, de l'automatisation de l'action. En ce sens, c'est un prolongement du projet technoscientifique de la modernité. La rationalisation va de pair avec une recherche constante d'objectivation de l'expérience, produite par l'automatisation et évacuant l'opérateur humain, si subjectif, du cœur du processus : les mathématiques construites par et pour la rationalisation ont été un moteur de ces transformations majeures. La délégation aux algorithmes est une relégation du statut de l'humain à celui d'utilisateur, ce qui modifie en profondeur notre perception du monde et nos possibles interactions avec le monde. Les mathématiques sont centrales dans les transformations épistémiques de la science depuis l'ère moderne, elles paraissent être devenues, au fil du 20^{ème} siècle, également un instrument universel de prescription et de formatage de nos actions.

Bibliographie

ABIR-AM P.G., 2009, « Synergy or Clash: Disciplinary and Marital Strategies in the Career of Mathematical Biologist Dorothy Wrinch » dans Pnina G. Abir-Am, Dorinda Outram et Margaret W. Rossiter (eds.), *Uneasy careers and intimate lives: women in science, 1789-1979*, New Brunswick, Rutgers University Press, p. 239-280.

ABIR-AM P.G., 1993, « Dorothy Maud Wrinch (1894-1976) » dans Louise S. Grinstein, Rose K Rose et Miriam H. Rafailovich (eds.), *Women in chemistry and physics: a biobibliographic sourcebook*, Westport, Greenwood Press, p. 605-612.

AGAR Jon, 2006, « What Difference Did Computers Make? », *Social Studies of Science*, 2006, vol. 36, n° 6, p. 869-907.

AGOGUE Marine, ARNOUX Frédéric, BROWN Ingi, HOOGE Sophie, HATCHUEL Armand, WEIL Benoît et TREMOUREUX Carl, 2013, *Introduction à la conception innovante: éléments théoriques et pratiques de la théorie C-K*, Paris, Presses des Mines, 60 p.

AHMED F. R. et CRUICKSHANK D. W. J., 1953, « Crystallographic calculations on the Manchester University electronic digital computer (Mark II) », *Acta Crystallographica*, octobre 1953, vol. 6, n° 10, p. 765-769.

AHMED F. R., HALL S. R. et HUBER C. P. (eds.), 1970, *Crystallographic computing: proceedings of an International Summer School organized by the Commission on Crystallographic Computing of the International Union of Crystallography and held in Ottawa, 4-11 August 1969*, Copenhagen, Munksgaard, 383 p.

ALDON Gilles, 2011, *Interactions didactiques dans la classe de mathématiques en environnement numérique : construction et mise à l'épreuve d'un cadre d'analyse exploitant la notion d'incident*, Thèse de l'Université Claude Bernard, Lyon 1.

ALTSHULER Edward E., 2013, *The Rise and Fall of Air Force Cambridge Research Laboratories*, Charleston, CreateSpace Independent Publishing Platform, 254 p.

AMBS Pierre, 2010, « Optical Computing: A 60-Year Adventure », *Advances in Optical Technologies*, 2010, ID 372652.

APPEL K. et HAKEN W., 1977, « Every planar map is four colorable. Part I: Discharging », *Illinois Journal of Mathematics*, septembre 1977, vol. 21, n° 3, p. 429-490.

ARCHIBALD Thomas, 1996, « From Attraction Theory to Existence Proofs: The Evolution of Potential-Theoretic Methods in the Study of Boundary-Value Problems, 1860–1890 », *Revue d'histoire des mathématiques*, 1996, n° 2, p. 67-93.

ARCHIBALD Thomas, 1989, « Energy and the Mathematization of Electrodynamics in Germany, 1845–1875 », *Arch. Internat. Hist. Sci.*, 1989, vol. 39, n° 123, p. 276–307.

ARNDT U. W. et PHILLIPS D. C., 1961, « The linear diffractometer », *Acta Crystallographica*, 10 août 1961, vol. 14, n° 8, p. 807-818.

ARNOLD Vladimir I, 1998, « On teaching mathematics », *Russian Mathematical Surveys*, 28 février 1998, vol. 53, n° 1, p. 229-236.

ARNOTT S., 1994, « John Monteath Robertson. 24 July 1900-27 December 1989 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 1994, vol. 39, p. 351-362.

ARSAC Jacques, 1970, *La science informatique*, Paris, Dunod, 233 p.

ARSAC Jacques, 1961, *Transformation de Fourier et théorie des distributions*, Paris, Dunod, 347 p.

AUBIN David, 2017, « On the Epistemic and Social Foundations of Mathematics as Tool and Instrument in Observatories, 1793–1846 » dans Johannes Lenhard et Martin Carrier (eds.), *Mathematics as a Tool: Tracing New Roles of Mathematics in the Sciences*, Cham, Springer International Publishing (coll. « Boston Studies in the Philosophy and History of Science »), p. 177-196.

AUBIN David, 2009, « Observatory Mathematics in the Nineteenth Century » dans Eleanore Robson et Jacqueline A. Steddal (eds.), *Oxford Handbook for the History of Mathematics*, Oxford, Oxford University Press, p. 273-298.

AUBIN David, 1998, *A Cultural History of Catastrophes and Chaos: around the « Institut des Hautes Études Scientifiques »*, France, PhD - Princeton University, Département d'Histoire.

AUBIN David et DAHAN Amy, 2002, « Writing the History of Dynamical Systems and Chaos: Longue Durée and Revolution, Disciplines and Cultures », *Historia Mathematica*, 2002, vol. 29, n° 3, p. 273-339.

AZAROFF Leonid V., 1986, « Martin Julian Buerger, 1903-1986 », *Journal of Applied Crystallography*, 1986, vol. 19, n° 4, p. 205-207.

AZAROFF Leonid V., 1954, « A One-Dimensional Fourier Analog Computer », *Review of Scientific Instruments*, 1954, vol. 25, n° 5, p. 471-477.

BACHELARD Gaston, 1934, *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Librairie Félix Alcan, 179 p.

BAIRD Davis, 2004, *Thing knowledge: a philosophy of scientific instruments*, Berkeley, University of California Press, 273 p.

BARBIN Evelyne, BENARD Dominique et MOUSSARD Guillaume, 2018, *Les mathématiques et le réel. Expériences, instruments, investigations*, Rennes, PUR.

BARNES Barry, BLOOR David et HENRY John, 1996, *Scientific knowledge: a sociological analysis*, Chicago, University of Chicago Press, 230 p.

BARRETT A. N. et ZWICK M., 1971, « A method for the extension and refinement of crystallographic protein phases utilizing the fast Fourier transform », *Acta Crystallographica Section A*, 1971, vol. 27, n° 1, p. 6-11.

BARROW-GREEN June, 2017, « “An exquisite machine”: Olaus Henrici’s harmonic analyser », *Oberwolfach Report*, 2017, n° 58, p. 3506-3510.

BARROW-GREEN June, 1997, *Poincaré and the three body problem*, Providence, American Mathematical Society, 272 p.

BARTHELEMY Jean-Hugues, 2015, « Glossaire Simondon : les 50 grandes entrées dans l’œuvre », *Appareil*, 31 décembre 2015, n° 16.

BATTIMELLI Giovanni, 1986, « On the History of the Statistical Theories of Turbulence », *Revista Mexicana Física*, 1986, vol. 32, p. 3-48.

BEAUVAL Y., DELBREIL J. P., CHARDENON J. P. et MEINADIER J. P., 1969, « Langage et système d’exploitation pour expériences nucléaires », *Revue de Physique Appliquée*, 1969, vol. 4, n° 2, p. 133-134.

- BEEVERS C. A., 1939, « A machine for the rapid summation of Fourier series », *Proceedings of the Physical Society*, 1939, vol. 51, n° 4, p. 660.
- BEEVERS C. A. et LIPSON H., 1985, « A Brief History of Fourier Methods in Crystal-structure Determination », *Australian Journal of Physics*, 1985, vol. 38.
- BEEVERS C. A. et LIPSON H., 1934, « A rapid method for the summation of a two-dimensional Fourier series », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1934, vol. 17, n° 114, p. 855-859.
- BELL Robert John, 1972, *Introductory Fourier transform spectroscopy*, New York, Academic Press, 382 p.
- BELOT Robert, 2015, *L'atome et la France: aux origines de la technoscience française*, Paris, Odile Jacob, 332 p.
- BENNETT J. M. et KENDREW J. C., 1952, « The computation of Fourier synthesis with a digital electronic calculating machine », *Acta Crystallographica*, 1952, vol. 5, n° 1, p. 109-116.
- BENNETT Jim, 2011, « Early Modern Mathematical Instruments », *Isis*, 2011, vol. 102, n° 4, p. 697-705.
- BERNAL J. D., 1945, « The Future of X-Ray Analysis », *Nature*, 16 juin 1945, vol. 155, p. 713-715.
- BERNARD Alain et PETITGIRARD Loïc, 2018, « L'histoire des sciences et des techniques dans cinq dispositifs innovants de formation professionnelle : une analyse comparative », *TREMA*, 2018, n° 48, p. 1-16.
- BLACKMAN Ralph B. et TUKEY John W., 1959, *The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering*, New York, Dover.
- BLANC-LAPIERRE André, FORTET Robert et KAMPE DE FERIET Joseph, 1953, *Théorie des fonctions aléatoires: applications à divers phénomènes de fluctuation*, Paris, Masson, 693 p.
- BLIN André, 1973, *Etude de la maintenabilité du Plurimat-20 de la société Intertechnique*, Gif-sur-Yvette, France, CEN Saclay, 17 p.
- BLONDEL A., 1925, « Une méthode potentiométrique d'Analyse Harmonique des ordres des courants alternatifs des alternateurs », *Revue générale de l'électricité*, mars 1925, vol. 17, p. 363-368.
- BLONDEL A., 1902, « Sur les oscillographes », *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 1902, vol. 1, n° 1, p. 273-302.
- BLONDEL A., 1893, « Oscillographes : nouveaux appareils pour l'étude des oscillations électriques lentes », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1893, n° 116, p. 502-506.
- BLONDEL A. et CARBENAY F., 1917, « Analyse harmonique des différences de potentiel alternatives par la résonance mécanique d'un barreau de fer aimanté - Systèmes oscillants dont le couple amortissant est proportionnel au carré de la vitesse angulaire », *Annales de Physique*, 1917, vol. 9, n° 8, p. 97-158.
- BOGERT B., HEALY M.J.R. et TUKEY J., 1963, « The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe craking » dans M. Rosenblatt (ed.), *Proceedings of a symposium on time series analysis*, New York, Wiley, vol.15, p. 209-243.
- BONDOT P., 1971, « Application de la transformée de Fourier performante aux calculs cristallographiques », *Acta Crystallographica Section A*, 1971, vol. 27, n° 5, p. 492-494.

BONNEUIL C., 2005, « Les transformations des rapports entre sciences et société en France depuis la Seconde Guerre Mondiale : un essai de synthèse », *Babou, I., Le Marec, J., Sciences, médias et société: colloque 15, 16, 17 juin 2004. Lyon, France : ENS-LSH*, 2005, p. 15-40.

BOOTH A. D., 1948, *Fourier technique in X-ray organic structure analysis*, Cambridge, Cambridge University Press, 106 p.

BOOTH Andrew D. et BOOTH Kathleen H., 1956, *Automatic digital calculators*, London, Butterworths, 261 p.

BORRELLI Ariana, 2017, « Were early modern optical diagrams mathematical instruments? », *Oberwolfach Report*, 2017, n° 58, p. 3537-3540.

BORWEIN Jonathan M. et BAILEY David H., 2004, *Mathematics by experiment: plausible reasoning in the 21st century*, Natick, AK Peters, 288 p.

BORWEIN Jonathan M., BAILEY David H. et GIRGENSOHN Roland, 2004, *Experimentation in mathematics: computational paths to discovery*, Natick, A. K. Peters, 357 p.

BOUCHAREINE Patrick, CONNES Janine et DELOUIS Hervé, 1977, « Théorie et traitement numérique des signaux donnés par les appareils analytiques », *Techniques de l'ingénieur*, 1977, vol. P205, p. 9-22.

BRACEWELL Ronald N., 1965, *The Fourier transform and its applications*, New York, McGraw-Hill, 381 p.

BRAGG W. H., 1915, *Bakerian Lecture: X-Rays and Crystal Structure*, London, Royal Society of London.

BRAGG W. L., 1944, « Lightning Calculations With Light », *Nature*, 15 juillet 1944, vol. 154, p. 69-72.

BRAGG W. L., 1942, « The X-Ray Microscope », *Nature*, 1 avril 1942, vol. 149, p. 470-471.

BRAGG W. L., 1939, « A New Type of 'X-Ray Microscope' », *Nature*, avril 1939, vol. 143, n° 3625, p. 678.

BRAGG W. L., 1929a, « The determination of parameters in crystal structures by means of Fourier series », *Proceedings of the Royal Society London*, 1929, vol. 123, n° 792, p. 537-559.

BRAGG W. L., 1929b, « XXI. An optical method of representing the results of X-ray analysis », *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 1929, vol. 70, n° 1-6, p. 475-492.

BRAGG W. L. et PERUTZ M. F., 1954, « The structure of haemoglobin - VI. Fourier projections on the 010 plane », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 14 septembre 1954, vol. 225, n° 1162, p. 315-329.

BRAGG W. L. et STOKES A. R., 1945, « X-Ray Analysis with the Aid of the "Fly's Eye" », *Nature*, septembre 1945, vol. 156, n° 3959, p. 332-333.

BRAGG W. L. et WEST J., 1930, « LXXV. A note on the representation of crystal structure by Fourier series », *Philosophical Magazine*, 1 novembre 1930, vol. 10, n° 66, p. 823-841.

BRAUN Ernest et MACDONALD Stuart, 1978, *Revolution in miniature: the history and impact of semiconductor electronics*, Cambridge, Cambridge University Press, 231 p.

BRAUN K.F., 1897, « Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme », *Ann. Physik Chemie*, 1897, vol. 60, p. 552-559.

BRAUN P.B., 1957, « The crystal structures of a new group of ferromagnetic compounds », *Philips research reports*, 1957, vol. 12, p. 491-548.

- BRECHENMACHER Frederic, 2010, « Une histoire de l'universalité des matrices mathématiques », *Revue de Synthèse*, 2010, vol. 131, n° 4, p. 569-603.
- BRILLINGER David R., 2002, « John W. Tukey's work on time series and spectrum analysis », *Annals of Statistics*, 2002, p. 1595-1618.
- BROWN Leroy, 1939, « A mechanical harmonic synthesizer-analyzer », *Journal of the Franklin Institute*, 1 décembre 1939, vol. 228, n° 6, p. 675-694.
- BRU L., RODRIGUEZ M. Perez et CUBERO M., 1952, « Application of Eller's Optical Machine to the Determination of the Molecular Structure of Gases by Electron Diffraction. II. Nonrigid Molecules », *The Journal of Chemical Physics*, 1952, vol. 20, n° 12, p. 1911.
- BUD Robert et WARNER Deborah Jean (eds.), 1998, *Instruments of science: an historical encyclopedia*, New York, Garland Pub., 709 p.
- BUERGER M. J., 1950, « Generalized Microscopy and the Two-Wave-Length Microscope », *Journal of Applied Physics*, septembre 1950, vol. 21, n° 9, p. 909-917.
- BUNN C., 1952, « Optical analogue methods and their use in crystal structure analysis » dans R. Pepinsky (ed.), *Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis*, Pennsylvania State College, Dept. of Physics, p. 106-110.
- BUNN C., 1946, *Chemical crystallography: an introduction to optical and X-ray methods*, Oxford, Clarendon Press, 422 p.
- BUSH V., 1936, « Instrumental analysis », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1936, vol. 42, n° 10, p. 649-669.
- BUSH V., 1931, « The differential analyzer. A new machine for solving differential equations », *Journal of the Franklin Institute*, octobre 1931, vol. 212, n° 4, p. 447-488.
- BUSH V. et CALDWELL S. H., 1945, « A new type of differential analyzer », *Journal of the Franklin Institute*, 1 octobre 1945, vol. 240, n° 4, p. 255-326.
- BUSH V. et WIENER N., 1929, *Operational circuit analysis*, New York, Wiley, 392 p.
- CAHIER Michel, 1980, *Les impatients ou la Folie de créer*, Paris, R. Laffont, 303 p.
- CAMPBELL George A., 1928, « The Practical Application of the Fourier Integral », *Bell System Technical Journal*, 1928, vol. 7, n° 4, p. 639-707.
- CAMPBELL George A., 1924, « Mathematics in Industrial Research », *Bell System Technical Journal*, 1924, vol. 3, n° 4, p. 550-557.
- CAMPBELL George A. et FOSTER Ronald M., 1931, *Fourier integrals for practical applications*, New York, Bell Telephone Laboratories.
- CAMPBELL-KELLY M., 1998, « Programming the EDSAC: early programming activity at the University of Cambridge », *IEEE Annals of the History of Computing*, octobre 1998, vol. 20, n° 4, p. 46-67.
- CAMPBELL-KELLY Martin, ASPRAY William, ENSMINGER Nathan et YOST Jeffrey R., 2014, *Computer: a history of the information machine*, Boulder, Westview Press, 360 p.
- CARE Charles, 2010, *Technology for Modelling: Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing*, London, Springer, 203 p.
- CARON François, 1998, *Les deux révolutions industrielles du XXe siècle*, Paris, Pocket, 589 p.
- CERN, 1969, « Courier du CERN - Publicité pour le NUDIAC », 1969, vol. 9, n° 6, 1969 p. 193.

- CERUZZI Paul E., 2003, *A history of modern computing*, Cambridge, MIT Press, 445 p.
- CHADAREVIAN Soraya de, 2002, *Designs for life: molecular biology after World War II*, Cambridge, Cambridge University press, 423 p.
- CHAMBERLAYNE Prue, BORNAT Joanna et WENGRAF Tom, 2000, *The Turn To Biographical Methods In Social Science: Comparative Issues And Examples*, London, Routledge.
- CHANDLER Alfred D., 2001, *Inventing the electronic century: the epic story of the consumer electronics and computer industries*, New York, The Free press, 321 p.
- CHARP S., 1949, « A New Fourier Coefficient Harmonic Analyzer », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1949, vol. 68, n° 1, p. 644-651.
- CHARTIER P. et PERRIER Alain, 1971, « Etude des échanges d'énergie et de masse au niveau d'une culture. Présentation d'un dispositif expérimental et premiers résultats sur maïs », *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 1971, 57(8), p. 660-670.
- CIPRA Barry, 2000, « SIAM: The Best of the 20th Century: Editors Name Top 10 Algorithms », *SIAM News*, 2000, vol. 33, n° 4.
- CIPRA Barry, 1993, « The FFT: Making Technology Fly », *SIAM News*, 1993, vol. 26, n° 3, p. 4.
- CLIFFORD W.K., 1873, « Graphic Representation of the Harmonic Components of a Periodic Motion », *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1873, p. 11-14.
- CLINE Stephan G. et MARSCHKE Norman D., 1972, « New capabilities in Digital Low-Frequency Spectrum Analysis », *Hewlett-Packard Journal*, 1972, vol. 23, n° 10, p. 14-20.
- COCHRAN W., 1948, « A critical examination of the Beevers–Lipson method of Fourier series summation », *Acta Crystallographica*, 1948, vol. 1, n° 2, p. 54-56.
- COCHRAN W. et CRICK F. H., 1952, « Evidence for the Pauling–Corey α -Helix in Synthetic Polypeptides », *Nature*, février 1952, vol. 169, n° 4293, p. 234-235.
- COCHRAN W., CRICK F. H. et VAND V., 1952, « The structure of synthetic polypeptides. I. The transform of atoms on a helix », *Acta Crystallographica*, 10 septembre 1952, vol. 5, n° 5, p. 581-586.
- COCKCROFT J. D., COE R. T., TYACKE J. A. et WALKER M., 1925, « An electric harmonic analyser », *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1925, vol. 63, n° 337, p. 69.
- COHEN Albert, 2011, « Sur la route des ondelettes », *Gazette de la SMF*, 2011, vol. 130, p. 19-36.
- COMPTON Arthur H., 1931, « The Optics of X-Rays », *Journal of the Optical Society of America*, 1 février 1931, vol. 21, n° 2, p. 75-89.
- COMRIE L. J., 1932, « The Application of the Hollerith Tabulating Machine to Brown's Tables of the Moon. (Plates 11–13.) », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 13 mai 1932, vol. 92, n° 7, p. 694.
- CONNES J., 1970, « Computing Problems in Fourier Spectroscopy », *Aspen International Conference on Fourier Spectroscopy*, 1970, p. 83.
- CONNES J., DELOUIS H., CONNES P., GUELACHVILI G., MAILLARD J.-P. et MICHEL G., 1970, « Spectroscopie de Fourier avec Transformation d'un Million de Points », *Nouv. Rev. Opt. Appl.*, 1970, vol. 1, p. 3-224.

- CONNES J. et NOZAL V., 1961, « Le filtrage mathématique dans la spectroscopie par transformation de fourier », *J. Phys. Radium*, 1961, vol. 22, n° 6, p. 359-366.
- CONNES Janine, 1961, « Recherches sur la spectroscopie par transformation de Fourier », *Revue d'optique théorique et instrumentale*, 1961, vol. 40, n° 5, p. 231-265.
- CONNES Janine et CONNES Pierre, 1966, « Near-Infrared Planetary Spectra by Fourier Spectroscopy. I. Instruments and Results », *Journal of the Optical Society of America*, juillet 1966, vol. 56, p. 896-910.
- CONNES P. et MICHEL G., 1967, « Un démultiplicateur de fréquence apériodique », *Revue de Physique Appliquée*, 1 septembre 1967, vol. 2, n° 3, p. 175-183.
- CONNES Pierre, 1992, « Pierre Jacquinot and the beginnings of Fourier transform spectrometry », *Journal de Physique II*, 1992, vol. 2, n° 4, p. 565-571.
- CONNES Pierre, 1984, « Early history of fourier transform spectroscopy », *Infrared Physics*, mai 1984, vol. 24, n° 2, p. 69-93.
- COOLEY James W., 1987a, « The Re-discovery of the Fast Fourier Transform Algorithm », *Mikrochimica Acta*, 1 août 1987, vol. 93, p. 33-45.
- COOLEY James W., 1987b, « How the FFT Gained Acceptance », *Proceedings of the ACM Conference on History of Scientific and Numeric Computation*, 1987, p. 97-100.
- COOLEY James W. et TUKEY John W., 1965, « An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series », *Mathematics of Computation*, 1965, vol. 19, n° 90, p. 297-301.
- CORNAFION, 1981, *Systèmes informatiques répartis: concepts et techniques*, Paris, Dunod, 367 p.
- CORRY Leo, 2017, « Turing's Pre-war Analog Computers: The Fatherhood of the Modern Computer Revisited », *Commun. ACM*, juillet 2017, vol. 60, n° 8, p. 50-58.
- COURANT Richard et HILBERT David, 1924, *Methoden der mathematischen Physik. Erster Band*, Berlin, Julius Springer, 450 p.
- COX E. G., 1952, « Some punch card methods in crystal structure analysis » dans R. Pepinsky (ed.), *Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis*, Pennsylvania State College, Dept. of Physics, p. 132-141.
- COX E. G., GROSS L. et JEFFREY G. A., 1947, « Use of Punched Card Tabulating Machines for Crystallographic Fourier Syntheses », *Nature*, 1947, n° 4039, p. 433-434.
- COX E. G. et JEFFREY G. A., 1949, « The use of "Hollerith" Computing Equipment in Crystal-Structure Analysis », *Acta Crystallographica*, 1949, vol. 2, p. 341-343.
- CROARKEN M. G., 1992, « The emergence of computing science research and teaching at Cambridge, 1936-49 », *IEEE Annals of the History of Computing*, 1992, vol. 14, n° 4, p. 10-15.
- CROARKEN M. G., 1990, *Early Scientific Computing in Britain*, New York, Clarendon Press.
- CROWFOOT D., BUNN C., ROGERS-LOW B.W. et TURNER-JONES A., 1949, « The X-ray crystallographic investigation of the structure of penicillin » dans Ha Clarke, John R. Johnson et Robert Robinson (eds.), *The chemistry of penicillin*, Princeton, Princeton University Press, p. 310-367.
- CRUICKSHANK D. W. J., 2000, « Sir Ernest Gordon Cox - 24 April 1906-23 June 1996 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, 2000, vol. 46, p. 67-84.

DAHAN Amy, 2005, *Jacques-Louis Lions, un mathématicien d'exception: entre recherche, industrie et politique*, Paris, Éditions La découverte, 269 p.

DAHAN Amy, CHABERT Jean-Luc et CHEMLA Karine (eds.), 1992, *Chaos et déterminisme*, Paris, Éditions du Seuil, 414 p.

DAHAN Amy et PEIFFER Jeanne, 1986, *Une histoire des mathématiques: routes et dédales*, Paris, Éditions du Seuil, 308 p.

DAHAN DALMEDICO Amy, 2004, « Early Developments of Nonlinear Science in Soviet Russia: The Andronov School at Gor'kiy », *Science in Context*, juin 2004, vol. 17, n° 1-2, p. 235-265.

DAHAN DALMEDICO Amy, 1996, « L'essor des mathématiques appliquées aux États-Unis : l'impact de la seconde guerre mondiale », *Revue d'histoire des mathématiques*, 1996, vol. 2, n° 2, p. 149-213.

DANIELSON G. C. et LANCZOS C., 1942, « Some improvements in practical Fourier analysis and their application to X-ray scattering from liquids », *Journal of the Franklin Institute*, 1 avril 1942, vol. 233, n° 4, p. 365-380.

DARRIEULAT Olivier, 1993, « Intertechnique : un sous-traitant indépendant », *Histoire, économie & société*, 1993, vol. 12, n° 1, p. 137-163.

DARRIGOL Olivier, 2007, « The acoustic origins of harmonic analysis », *Archive for History of Exact Sciences*, 1 juillet 2007, vol. 61, n° 4, p. 343-424.

DASTON Lorraine (ed.), 2004, *Things that talk: object lessons from art and science*, New York, Zone Books, 447 p.

DASTON Lorraine (ed.), 2000, *Biographies of scientific objects*, Chicago, University of Chicago Press, 307 p.

DEBAZ Josquin et ROUX Sophie, 2007, « D'une Affaire aux Autres » dans Sophie Roux (ed.), *Retours Sur l'Affaire Sokal*, Paris, Harmattan, p. 1-48.

DELOUIS Hervé, 1970, « Fourier Transformation of a 10exp6 Samples Interferogram », *Aspen International Conference on Fourier Spectroscopy*, 1970, p. 145.

DELOUIS Hervé, 1968, *Nouvelles méthodes de calcul relatives à la spectroscopie par transformation de Fourier*, Thèse de 3ème cycle, Université Paris Sud, Orsay, 89 p.

DEMURO Antonietta, 2018, *La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL*, Thèse de doctorat, Université Charles de Gaulle - Lille III, Lille.

DEN HARTOG Jacob Pieter, 1934, *Mechanical vibrations*, New York, McGraw-Hill.

DHOMBRES Jean et ROBERT Jean-Bernard, 1998, *Joseph Fourier (1768-1830): créateur de la physique-mathématique*, Paris, Belin (coll. « Un savant, une époque »).

DICK Stephanie, 2015a, « Of Models and Machines: Implementing Bounded Rationality », *Isis*, septembre 2015, vol. 106, n° 3, p. 623-634.

DICK Stephanie, 2015b, *After Math: (Re)configuring Minds, Proof, and Computing in the Postwar United States*, PhD, Harvard University, Cambridge, 239 p.

DOSSE François, 1987, *L'Histoire en miettes: des « Annales » à la « nouvelle histoire »*, Paris, La Découverte, 268 p.

DOWEK Gilles, 2011, *Les métamorphoses du calcul: une étonnante histoire de mathématiques*, Paris, Poche-Le Pommier, 231 p.

DUANE William, 1925, « The Calculation of the X-Ray Diffracting Power at Points in a Crystal », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1 août 1925, vol. 11, n° 8, p. 489-493.

DUCLERT Vincent, 2004, « La naissance de la délégation générale à la recherche scientifique et technique », *Revue française d'administration publique*, 2004, vol. 112, n° 4, p. 647-658.

DUCLERT Vincent et CHATRIOT Alain, 2012, *Le gouvernement de la recherche*, Paris, La Découverte.

DUDELL W., 1897, « Oscillographs », *The Electrician*, 1897, vol. 39, p. 636-638.

DUFFIEUX Pierre Michel, 1946, *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Rennes, France, Imprimeries Oberthur, 232 p.

DUFFIEUX Pierre Michel, 1942, « Analyse harmonique des images optiques (III) - (Types d'incertitude) », *Annales de Physique*, 1942, vol. 11, n° 17, p. 209-236.

DUFFIEUX Pierre Michel, 1940, « Analyse harmonique des images optiques - (Remarques sur le pouvoir de résolution) », *Annales de Physique*, 1940, vol. 11, n° 14, p. 302-338.

DUHEM Pierre, 1908, *Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris, A. Hermann, 143 p.

DUNKERLEY B. D. et LIPSON H., 1955, « A Simple Version of Bragg's X-ray Microscope », *Nature*, juillet 1955, vol. 176, n° 4471, p. 81-82.

DURAND-RICHARD Marie-José, 2018, « De l'analyseur différentiel à l'ordinateur : le parcours de Douglas R. Hartree (1897-1958) », *Revue de Synthèse*, 2018, vol. 139, n° 3-4, p. 282-318.

DURAND-RICHARD Marie-José, 2016, « De la prédiction des marées : entre calcul, observation et mécanisation (1831-1876) », *Cahiers François Viète, série II*, 2016, n° 8-9.

DURAND-RICHARD Marie-José, 2013, « La prédiction des marées : théorisation et mécanisation aux 19e et 20e siècles », *Rivista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, 2013, vol. 6, n° 1.

DURAND-RICHARD Marie-José, 2004, « Babbage et Boole : les lois du calcul symbolique », *Intellectica*, 2004, vol. 39, n° 2, p. 23-53.

DURAND-RICHARD Marie-José, *Historiographie du calcul graphique*, [URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01516382/document>], consulté le 16 mars 2019.

EDGAR R. F., LAWRENSON B. et RING J., 1967, « An optical analogue Fourier transformer », *Le Journal de Physique Colloques*, mars 1967, vol. 28, n° C2, p. C2-73-C2-78.

EDWARDS Paul N., 1996, *The closed world: computers and the politics of discourse in Cold War America*, Cambridge, The MIT Press, 440 p.

ELIAS Peter, 1953, « Optics and Communication Theory », *Journal of the Optical Society of America*, 1 avril 1953, vol. 43, n° 4, p. 229-232.

ELIAS Peter, GREY David S. et ROBINSON David Z., 1952, « Fourier Treatment of Optical Processes », *Journal of the Optical Society of America*, 1 février 1952, vol. 42, n° 2, p. 127-134.

ELLER G. von, 1955, « Le photosommateur harmonique et ses possibilités. II. — Structure du chlorhydrate de paratoluidine », *Bulletin de Minéralogie*, 1955, vol. 78, n° 4, p. 275-300.

ESCUDE Bernard, GAZANHES Claude, TACHOIRE Henri et TORRA Vicenç, 2001, *Des cordes aux ondelettes. L'analyse en temps et en fréquence avant et après Joseph Fourier, Un inverseur de*

l'équation de la chaleur de Fourier: le calorimètre à conduction, Aix-en-Provence, Publications de l'Université de Provence, 482 p.

ESPEL P., 2007, « Développement d'un wattmètre numérique à échantillonnage », *Revue française de métrologie*, 2007, vol. 4, n° 12, p. 3-12.

FAGEN M. D., JOEL Amos E. et SCHINDLER G. E., 1984, *A History of Engineering and Science in the Bell System: Communications sciences (1925-1980)*, New York, The Bell Telephone Laboratories, 552 p.

FARGE Marie, GROSSMANN Alex, MEYER Yves, PAUL Thierry, RISSET Jean-Claude, SARACCO Ginette et TORRESANI Bruno, 2013, « Les ondelettes et le CIRM », *Gazette des Mathématiciens*, 2013, vol. 131, p. 47-57.

FATOU Pierre, 1907, *Séries trigonométriques et séries de Taylor*, Thèse de doctorat, Université de Paris, Faculté des sciences, Paris.

FEJER Leopold, 1900, « Sur les fonctions bornées et intégrables », *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 10 décembre 1900, p. 984-987.

FELLGETT P., 1984, « Three concepts make a million points », *Infrared Physics*, 1 mai 1984, vol. 24, n° 2, p. 95-98.

FELLGETT P., 1958a, « On numerical Fourier transformation, with special reference to Lipson-Beevers strips », *Journal of Scientific Instruments*, 1958, vol. 35, n° 7, p. 257.

FELLGETT P., 1958b, « Spectromètre interférentiel Multiplex pour mesures infra-rouges sur les étoiles », *Le Journal de Physique et Le Radium*, 1958, vol. 19, p. 237.

FELLGETT P., 1952, « Multichannel Spectrometry », *Abstracts of OSU International Symposium on Molecular Spectroscopy*, 1952.

FERREIROS José, 2013, « On the Very Notion of Applied Mathematics », *Oberwolfach Report*, 2013, 12/2013, p. 726-728.

FIRLE Tomas E., 1956, « Low-Frequency Power Spectrum Analyzer », *Review of Scientific Instruments*, 1956, vol. 27, n° 3, p. 140-143.

FLOOD Raymond, RICE Adrian et WILSON Robin (eds.), 2011, *Mathematics in Victorian Britain*, Oxford, Oxford University Press, 466 p.

FORD Mike, 2002, « A Short History of the Perkin-Elmer Model 137 Infracord (and its progeny) », *Internet Journal of Vibrational Spectroscopy*, 2002, vol. 6, n° 1.

FORMAN Michael L., 1966, « Fast Fourier-Transform Technique and Its Application to Fourier Spectroscopy », *Journal of the Optical Society of America*, 1966, vol. 56, n° 7, p. 978-979.

FOURIER J.B. Joseph, 1822, *Théorie analytique de la chaleur*, Paris, Firmin Didot.

FRANCESCHELLI Sara, 2001, *Construction de signification physique dans le métier de physicien: Le cas du chaos déterministe*, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot - Paris 7, France, 194 p.

FRANK V., 1957, « A Fourier analogue-computer of the Hagg-Laurent type », *Journal of Scientific Instruments*, 1957, vol. 34, n° 5, p. 210.

FRATER Robert H., GOSS William M. et WENDT Harry W., 2017, *Four pillars of radio astronomy: Mills, Christiansen, Wild, Bracewell*, Cham, Springer, 199 p.

FRITSCH Rudolf et FRITSCH Gerda, 1998, *The Four-Color Theorem: History, Topological Foundations, and Idea of Proof*, New York, Springer-Verlag.

- FRONDEL C., 1988, « Memorial of Martin Julian Buerger - April 8, 1903-February 26, 1986 », *American Mineralogist*, 1988, vol. 73, p. 1483-1485.
- FRY Thornton C., 1941, « Industrial Mathematics », *The Bell System Technical Journal*, 1941, XX, n° 3, p. 255-292.
- GABOR D., 1946, « Theory of communication. Part 1: The analysis of information », *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, novembre 1946, vol. 93, n° 26, p. 429-441.
- GALISON Peter, 2008, « Ten Problems in History and Philosophy of Science », *Isis*, 2008, vol. 99, n° 1, p. 111-124.
- GALISON Peter, 1997, *Image and logic: a material culture of microphysics*, Chicago, University of Chicago Press, 955 p.
- GALISON Peter, 1994, « The Ontology of the Enemy: Norbert Wiener and the Cybernetic Vision », *Critical Inquiry*, 1994, vol. 21, n° 1, p. 228-266.
- GEBBIE H. A., 1984, « Fourier transform spectroscopy—Recollections of the period 1955–1960 », *Infrared Physics*, 1 mai 1984, vol. 24, n° 2, p. 105-109.
- GEBBIE H. A., 1957, « Detection of Submillimeter Solar Radiation », *Physical Review*, 1957, vol. 107, n° 4, p. 1194-1195.
- GEBBIE H. A. et VANASSE G. A., 1956, « Interferometric Spectroscopy in the Far Infra-red », *Nature*, août 1956, vol. 178, n° 4530, p. 432.
- GERNELLE François, 1998, « Communication sur les choix architecturaux et technologiques qui ont présidé à la conception du “Micral” premier micro-ordinateur au monde », Toulouse, CEPADUES.
- GERTNER Jon, 2013, *The idea factory: Bell Labs and the great age of American innovation*, New York, Penguin Books, 422 p.
- GINOUX Jean-Marc, 2015, *Histoire de la théorie des oscillations non linéaires: de Poincaré à Andronov*, Paris, Hermann, 435 p.
- GINOUX Jean-Marc et PETITGIRARD Loïc, 2010a, « Poincaré's forgotten conferences on wireless telegraphy », *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1 août 2010, vol. 22, n° 11, p. 3617.
- GINOUX Jean-Marc et PETITGIRARD Loïc, 2010b, « L'histoire des oscillations de relaxation : de Gérard-Lescuyer (1880) à Van der Pol (1926) - Comptes-Rendus des Rencontres du Non Linéaire 13 janvier 2010 », Paris, Institut Henri-Poincaré.
- GISPERT H., 1995, « A propos du bicentenaire du Cnam. Deux siècles d'enseignement des mathématiques en vue des applications. », *MATAPLI*, 1995, n° 42, p. 29-38.
- GLEICK James, 1989, *La théorie du chaos: vers une nouvelle science*, Paris, Albin Michel, 424 p.
- GRATTAN-GUINNESS Ivor, 1993, « The ingénieur savant, 1800–1830 A Neglected Figure in the History of French Mathematics and Science », *Science in Context*, 1993, vol. 6, n° 2, p. 405-433.
- GRATTAN-GUINNESS Ivor, 1972, *Joseph Fourier, 1768-1830; a survey of his life and work, based on a critical edition of his monograph on the propagation of heat, presented to the Institut de France in 1807*, Cambridge, MIT Press.

GRATTAN-GUINNESS Ivor, 1970, *The development of the foundations of mathematical analysis from Euler to Riemann*, Cambridge, MIT Press, 186 p.

GRIFFITHS Peter R., 2017, « The Early Days of Commercial FT-IR Spectrometry: A Personal Perspective », *Applied Spectroscopy*, 2017, vol. 71, n° 3, p. 329-340.

GROSSETTI Michel, 2004, « “L’académisation des savoirs techniques. La lente progression des sciences d’ingénieurs dans les universités et la recherche académique”, Communication pour le Groupe de Travail “Sciences, innovations technologiques et sociétés” », AISLF, Congrès de Tours.

GROSSMANN A. et MORLET J., 1984, « Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape », *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1 juillet 1984, vol. 15, n° 4, p. 723-736.

GUINIER André et ELLER Gérard Von, 1957, « Les méthodes expérimentales des déterminations de structures cristallines par rayons X » dans *Structural Research / Strukturforschung*, Berlin, Springer Verlag, p. 1-97.

GUTHLEBEN Denis et BLAY Michel, 2013, *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours : une ambition nationale pour la science*, Paris, Armand Colin, 495 p.

HACKETT Edward J., AMSTERDAMSKA Olga, LYNCH Michael et WAJCMAN Judy (eds.), 2008, *The handbook of science and technology studies*, Cambridge, MIT Press, 1065 p.

HAGG G. et LAURENT T., 1946, « A Machine for the Summation of Fourier Series », *Journal of Scientific Instruments*, 1946, vol. 23, n° 7, p. 155.

HAIGH Thomas, 2017, « The History of Unix in the History of Software », *Cahiers d’histoire du Cnam*, 2017, vol. 7-8 (II), p. 77-90.

HAIGH Thomas, 2010, « John R. Rice: Mathematical Software Pioneer », *IEEE Annals of the History of Computing*, octobre 2010, vol. 32, n° 4, p. 72-81.

HAIGH Thomas, 2008, « Cleve Moler: Mathematical Software Pioneer and Creator of Matlab », *IEEE Annals of the History of Computing*, janvier 2008, vol. 30, n° 1, p. 87-91.

HAIGH Thomas, PRIESTLEY Mark et ROPE Crispin, 2016, *ENIAC in Action: Making and Remaking the Modern Computer*, Cambridge, The MIT Press.

HAMAKER J. P., O’SULLIVAN J. D. et NOORDAM J. E., 1977, « Image sharpness, Fourier optics, and redundant-spacing interferometry », *Journal of the Optical Society of America*, 1 août 1977, vol. 67, n° 8, p. 1122-1123.

HAMEL Jacques, 1995, « Réflexions sur l’interdisciplinarité à partir de Foucault, Serres et Granger », *Revue européenne des sciences sociales*, 1995, vol. 33, n° 100, p. 191-205.

HAMMACK Bill, KRANZ Steve et CARPENTER Bruce, 2014, *Albert Michelson’s Harmonic Analyzer: A Visual Tour of a Nineteenth Century Machine that Performs Fourier Analysis*, USA, Articulate Noise Books, 130 p.

HANSON A. W., LIPSON H. et TAYLOR C. A., 1953, « The application of the principles of physical optics to crystal-structure determination », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 7 juillet 1953, vol. 218, n° 1134, p. 371-384.

HARSHA Peter, MOSIER Steve, BRUGGEMAN David, YOUSEFI Najma, WOELLERT Lorraine, FISHER Eric et JESSE Jolene Kay, 2004, *Chasing Moore’s Law: Information Technology Policy in the United States*, Raleigh, NC, Scitech Publishing, 208 p.

- HAVIGHURST R. J., 1925, « The Distribution of Diffracting Power in Sodium Chloride », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1 août 1925, vol. 11, n° 8, p. 502-507.
- HAWKES Peter et BONNET Noël, 1997, « A Symposium in Honour of Pierre-Michel Duffieux », *Microscopy Microanalysis Microstructures*, 1997, vol. 8, n° 1, p. IX-XIV.
- HAYAT Samuel, 2017, « Les savoirs et leurs publics : l'exemple du conservatoire des arts et métiers (19e-21e siècles) », *Innovations*, 20 janvier 2017, n° 52, n° 1, p. 139-160.
- HELDEN Albert VAN et HANKINS Thomas L., 1994, « Introduction: Instruments in the History of Science », *Osiris*, 1994, vol. 9, p. 1-6.
- HENRICI Olaus, 1894, « On a new Harmonic Analyser », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1894, vol. 38, n° 230, p. 110-121.
- HERIVEL John, 1975, *Joseph Fourier: the man and the physicist*, Oxford, Clarendon press, 350 p.
- HERIVEL John, 1973, « The Influence of Fourier on British Mathematics », *Centaurus*, 1 mars 1973, vol. 17, n° 1, p. 40-57.
- HETTICH Alfred, 1935, « Beiträge zur Methodik der Strukturbestimmung », *Zeitschrift für Kristallographie*, 1935, vol. 90, n° 1-6, p. 473-492.
- HODDESON Lillian, BRAUN Ernest, TEICHMANN Jürgen et WEART Spencer R. (eds.), 1992, *Out of the crystal maze: chapters from the history of solid state physics*, Oxford, Oxford University Press, 697 p.
- HODDESON Lillian et DAITCH Vicki, 2002, *True genius: the life and science of John Bardeen : the only winner of two Nobel prizes in physics*, Washington (D.C.), Joseph Henry press, 467 p.
- HOFFMAN Joseph E., 1969, « Real-Time Fourier Spectroscopy », *Applied Optics*, 1 février 1969, vol. 8, n° 2, p. 323-327.
- HOFFMAN Joseph E. et VANASSE George A., 1966, « Real-Time Spectral Synthesis in Fourier Spectroscopy », *Applied Optics*, 1 juillet 1966, vol. 5, n° 7, p. 1167-1169.
- HOWELL Barton, CHRISTENSEN Carl J. et McLACHLAN Dan, 1951, « A Method for Making Accurately Reproducible Masks of the Huggins Type », *Nature*, 1951, vol. 168, n° 4268, p. 282.
- HOWELL Barton et McLACHLAN Dan, 1955, « Table Model Projector for the Bragg-Huggins Masks », *Review of Scientific Instruments*, 1955, vol. 26, n° 1, p. 93.
- HUGGINS Maurice L., 1945, « Photographic Fourier Synthesis », *Nature*, janvier 1945, vol. 155, n° 3923, p. 18-19.
- HUGGINS Maurice L., 1944, « Photography of Crystal Structures », *The Journal of Chemical Physics*, 1 décembre 1944, vol. 12, n° 12, p. 520.
- HUGGINS Maurice L., 1941, « Photographic Fourier Syntheses », *Journal of the American Chemical Society*, 1 janvier 1941, vol. 63, n° 1, p. 66-69.
- HUMPHREYS Paul, 2007, *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford, Oxford University Press, 192 p.
- HUNTER Graeme K., 2004, *Light is a messenger: the life and science of William Lawrence Bragg*, Oxford, Oxford University Press, 301 p.

- IMMIRZI A., 1973, « A general Fourier program for X-ray crystal-structure analysis which utilizes the Cooley–Tukey algorithm », *Journal of Applied Crystallography*, 1973, vol. 6, n° 3, p. 246-249.
- JACQUINOT P. et DUFOUR Ch., 1948, « Optical conditions in the use of photo-electric cells in spectrographs and interferometers », *Journal des recherches du CNRS*, 1948, n° 6, p. 91.
- JACQUINOT Pierre, 1984, « How the search for a throughput advantage led to Fourier transform spectroscopy », *Infrared Physics*, 1 mai 1984, vol. 24, n° 2, p. 99-101.
- JACQUINOT Pierre, 1954a, « The Luminosity of Spectrometers with Prisms, Gratings, or Fabry-Perot Etalons », *Journal of the Optical Society of America*, 1 octobre 1954, vol. 44, n° 10, p. 761-765.
- JACQUINOT Pierre, 1954b, « “Quelques perspectives d’avenir en spectrographie instrumentale” publié dans les Compte-rendus du 17ème congrès du GAMS », Paris.
- JACQUINOT Pierre, 1948, « Compte-rendu du 10ème congrès du Groupement pour l’Avancement des Méthodes d’Analyse Spectrographique », Laboratoire central de l’armement, Paris.
- JEANNERET Yves, 1998, *L’affaire Sokal, ou la querelle des impostures*, Paris, Presses universitaires de France, 274 p.
- JENKINS John I., 2008, *William and Lawrence Bragg, father and son: the most extraordinary collaboration in science*, Oxford, Oxford University Press, 458 p.
- JOERGES B. et SHINN Terry, 2001, *Instrumentation Between Science, State and Industry*, Dordrecht, Kluwer Academic, 288 p.
- JOHNSON Roger G., 2010, « Andrew D. Booth – Britain’s Other “Fourth Man” » dans *History of Computing. Learning from the Past*, Berlin, Springer (coll. « IFIP Advances in Information and Communication Technology »), p. 26-37.
- JOHNSTON Sean F., 2006, *Holographic visions: a history of new science*, Oxford, Oxford University Press, 518 p.
- JOHNSTON Sean F., 2001, « In Search of Space: Fourier Spectroscopy 1950–1970 » dans Bernward Joerges et Terry Shinn (eds.), *Instrumentation Between Science, State and Industry*, Dordrecht, Kluwer Academic (coll. « Sociology of the Sciences »), p. 121-141.
- JOHNSTON Sean F., 1991, *Fourier transform infrared: a constantly evolving technology*, New York, E. Horwood, 348 p.
- JOHNSTON Sean F., 1990, « The evolution of FTIR technology », *Chemistry in Britain*, juin 1990, vol. 26, p. 573-579.
- JOHO W., 1975, « Seventh International Conference on Cyclotrons and their Applications », Basel, Springer.
- JOURDAIN G., 1993, « Henri Mermoz, pionnier du traitement du signal », *Traitement du Signal*, 1993, vol. 10, n° 4.
- KAHANE Jean-Pierre, 2009, « Fourier, un mathématicien inspiré par la physique », *CNRS*, 2009, (coll. « Images de la physique »), p. 3-10.
- KAHANE Jean-Pierre, 1998, « Le mouvement brownien », Actes du colloque à la mémoire de Jean Dieudonné (Nice 1996), SMF.

KAHANE Jean-Pierre, 1966, « Norbert Wiener et l'analyse de Fourier », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1966, vol. 72, n° 1, p. 42-47.

KAHANE Jean-Pierre et LEMARIE-RIEUSSET Pierre Gilles, 1998, *Séries de Fourier et ondelettes*, Paris, Cassini.

KARMAN Theodore VON, 1943, « Tooling up mathematics for engineering », *Quarterly of Applied Mathematics*, 1943, vol. 1, n° 1, p. 2-6.

KARMAN Theodore VON, 1940, « The engineer grapples with nonlinear problems », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1940, vol. 46, n° 8, p. 615-683.

KELVIN William Thomson et TAIT Peter Guthrie, 1867, *Treatise on natural philosophy*, Oxford, Clarendon.

KEVLES Daniel J., 1995, *The physicists: the history of a scientific community in modern America*, Cambridge, Harvard University Press, 489 p.

KLERER Melvin et REINFELDS Juris (eds.), 1967, *Symposium on Interactive Systems for Experimental Applied Mathematics: Proceedings of the Association for Computing Machinery Inc. Symposium*, New York, ACM.

KNOTT George, 1940, « Molecular structure factors and their application to the solution of the structures of complex organic crystals », *Proceedings of the Physical Society*, mars 1940, vol. 52, n° 2, p. 229-238.

KRANZ Frederick, 1927, « A mechanical synthesizer and analyzer », *Journal of the Franklin Institute*, 1927, vol. 204, n° 2, p. 245-262.

LAS VERGNAS Olivier, 2011, « L'institutionnalisation de la « culture scientifique et technique », un fait social français (1970 – 2010) », *Savoirs*, 2011, n° 27, n° 3, p. 9-60.

LATOUR Bruno et WOOLGAR Steve, 1988, *La vie de laboratoire: la production des faits scientifiques*, traduit par Michel Biezunski, Paris, Éditions La Découverte, 299 p.

LAZARD Emmanuel et MOUNIER-KUHN Pierre, 2016, *Histoire illustrée de l'informatique*, Les Ullis, EDP Sciences, 280 p.

LE BOLLOC'H-PUGES Chantal, 1991, *La politique industrielle française dans l'électronique : De l'émergence de l'industrie à la fin de la décennie quatre-vingt*, Paris, L'Harmattan, 252 p.

LE BOSS Bruce, 1975, « Microprocessors spark a quiet revolution in instrumentation », *Electronic News*, 1975, n° 4, p. 1.

LE CORBEILLER Philippe, 1931, *Les systèmes autoentretenus et les oscillations de relaxation : conférences faites au Conservatoire national des arts et métiers les 6 et 7 mai 1931*, Paris, Hermann.

LE MASSON Pascal, WEIL Benoît et HATCHUEL Armand, 2014, *Théorie, méthodes et organisations de la conception*, Paris, Transvalor - Presses des Mines, 461 p.

LECOLLINET Michel, 2015, « Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam depuis 1967 », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2015 p. 109-128.

LÉCUYER Christophe, 2006, *Making Silicon Valley: innovation and the growth of high tech, 1930-1970*, Cambridge, MIT Press, 393 p.

LENHARD Johannes et CARRIER Martin, 2017, *Mathematics As a Tool: Tracing New Roles of Mathematics in the Sciences*, Cham, Springer International Publishing AG, 286 p.

- LETTE Michel, 2018, « La culture ordinaire, une heuristique des STS pour former à la médiation culturelle des sciences et techniques en société », *TREMA*, 2018, n° 48.
- LEVINSON N., 1966, « Wiener's life », *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1966, vol. 72, n° 1, p. 1-32.
- LILEN Henri, 1975, *Du microprocesseur au micro-ordinateur: introduction à la micro-informatique*, Paris, Éditions Radio, 272 p.
- LIPSON H. et BEEVERS C. A., 1936, « An improved numerical method of two-dimensional fourier synthesis for crystals », *Proceedings of the Physical Society*, 1936, vol. 48, n° 5, p. 772.
- LOEWENSTEIN E., 1970, « Fourier Spectroscopy: An Introduction », *Aspen International Conference on Fourier Spectroscopy*, 1970, p. 3-17.
- LOHMANN A., 1959, « Das Moiré-Gitter als Vielseitiges Testobjekt: Photoelektrische Aberrationsmessung », *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1 janvier 1959, vol. 6, n° 1, p. 37-41.
- LORENZ Edward, 1993, *The essence of chaos*, London, UCL press, 227 p.
- LORENZ Edward, 1964, « The problem of deducing the climate from the governing equations », *Tellus*, 1964, XVI, n° 1, p. 1-11.
- LOW J.D., 1970, « Fourier Transform Spectrometers- Part Three », *Journal of Chemical Education*, 1970, vol. 47, n° 5, p. 349.
- LÜTZEN Jesper, 1982, *The prehistory of the theory of distributions*, New York, Springer-Verlag, 232 p.
- MACEWAN Douglas et BEEVERS Cecil Arnold, 1942, « A Machine for the Rapid Summation of Fourier Series », *Journal of Scientific Instruments*, 1942, vol. 19, n° 10, p. 150.
- MAITTE Bernard, 2014, *Histoire des cristaux*, Paris, Hermann, 334 p.
- MALLAT S. G., 1989, « A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, juillet 1989, vol. 11, n° 7, p. 674-693.
- MALONE Michael S., 1995, *The Microprocessor: A Biography*, New York, Springer-Verlag, 370 p.
- MANCOSU Paolo, 2008, *The Philosophy of Mathematical Practice*, Oxford, Oxford University Press, 460 p.
- MARECHAL A. et CROCE P., 1953, « Un filtre de fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1953, vol. 237, n° 12, p. 607-609.
- MARECHAL André, 1976, « Pierre-Michel Duffieux », *Physics Today*, 1976, vol. 29, n° 11, p. 85.
- MARTINEZ Jean-Philippe, 2017, « Beyond computational difficulties: Survey of the two decades from the elaboration to the extensive application of the Hartree-Fock method », *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2017, vol. 60, p. 123-135.
- MASANI Pesi Rustom, 1990, *Norbert Wiener, 1894-1964*, Basel, Birkhäuser, 416 p.
- MATTHEWS John N. S et HEALY Michael J. R, 1998, *In honour of Professor Michael Healy*, Chichester, Wiley.

- MCCORDUCK Pamela, 1979, *Machines who think: a personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence*, San Francisco, W. H. Freeman, 375 p.
- MERMOZ Henri, 1967, « La transformée de fourier en optique et ses possibilités d'application », *Annales des Télécommunications*, 1 janvier 1967, vol. 22, n° 1-2, p. 17-39.
- MERTZ Lawrence, 1967, « Auxiliary computation for Fourier spectrometry », *Infrared Physics*, 1 mars 1967, vol. 7, n° 1, p. 17-23.
- MERTZ Lawrence, 1956, « Optical Fourier Synthesizer », *Journal of the Optical Society of America*, 1956, vol. 46, n° 7, p. 548-551.
- MERTZ P. et GRAY F., 1934, « A Theory of Scanning and Its Relation to the Characteristics of the Transmitted Signal in Telephotography and Television », *Bell System Technical Journal*, 1934, vol. 13, n° 3, p. 464-515.
- MEYER Yves, 2008, « Hommage à Jean Morlet (52), inventeur de la théorie des ondelettes », *La Jaune et la Rouge*, 2008, n° 633.
- MICHELSON A. A. et STRATTON S. W., 1898a, « A new harmonic analyzer », *American Journal of Science*, 1898, Series 4 Vol. 5, n° 25, p. 1-13.
- MICHELSON A. A. et STRATTON S. W., 1898b, « On a New Harmonic Analyzer », *Philosophical Magazine*, 1898, vol. 45, p. 85-91.
- MILLER Dayton C., 1916a, « The Henrici harmonic analyzer and devices for extending and facilitating its use », *Journal of the Franklin Institute*, 1 septembre 1916, vol. 182, n° 3, p. 285-322.
- MILLER Dayton C., 1916b, « A 32-element harmonic synthesizer », *Journal of the Franklin Institute*, 1 janvier 1916, vol. 181, n° 1, p. 51-81.
- MINDELL David A., 2003, *Between Human and Machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics*, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 456 p.
- MINORSKY N., 1947, « A dynamical analogue », *Journal of the Franklin Institute*, 1 février 1947, vol. 243, n° 2, p. 131-149.
- MODY Cyrus C.M., 2017, *The long arm of Moore's Law: Microelectronics and American science*, Cambridge, MIT Press, 284 p.
- MODY Cyrus C.M., 2016, « Santa Barbara Physicists in the Vietnam Era » dans David Kaiser et W. Patrick McCray (eds.), *Groovy science: knowledge, innovation, and American counterculture*, Chicago, University of Chicago Press.
- MODY Cyrus C.M., 2011, *Instrumental community: probe microscopy and the path to nanotechnology*, Cambridge, The MIT Press, 260 p.
- MOHANTI H. B. et BOOTH A. D., 1955, « A simple electronic Fourier synthesizer », *Journal of Scientific Instruments*, novembre 1955, vol. 32, n° 11, p. 442-444.
- MOLER Clive et DONGARRA Jack, 1984, « EISPACK: a package for solving matrix eigenvalue problems » dans Wayne R. Cowell (ed.), *Sources and development of mathematical software*, Englewood Cliffs (N.J.), Prentice-Hall, p. 68-87.
- MONGIN Philippe, 2003, « L'axiomatisation et les théories économiques », *Revue économique*, 2003, Vol. 54, n° 1, p. 99-138.
- MORILLON Claude, 1996, *Instrumentation scientifique Cours C 1ère partie: Signal et bruit*, Paris, CNAM/ Médias, 21 p.

- MORILLON Claude, 1987, *Instrumentation scientifique: cours B2*, Paris, Cnam, 209 p.
- MORILLON Claude, 1986, *Instrumentation scientifique: cours B1*, Paris, Cnam.
- MORLET J., ARENS G., FOURGEAU E. et GIARD D., 1982a, « Wave propagation and sampling theory; Part I, Complex signal and scattering in multilayered media », *Geophysics*, 1 février 1982, vol. 47, n° 2, p. 203-221.
- MORLET J., ARENS G., FOURGEAU E. et GIARD D., 1982b, « Wave propagation and sampling theory—Part II: Sampling theory and complex waves », *Geophysics*, 1 février 1982, vol. 47, n° 2, p. 222-236.
- MORRIS P. R., 1990, *A history of the world semiconductor industry*, London, Peregrinus, 171 p.
- MORRIS Peter J.T. (ed.), 2002, *From classical to modern chemistry: the instrumental revolution*, Cambridge, Royal Society of Chemistry : Science Museum, 347 p.
- MOULIN Anne-Marie, 1999, « Instrument » dans Dominique Lecourt (ed.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris, PUF, p. 633-636.
- MOUNIER-KUHN Pierre, 2010, *L'informatique en France*, Paris, Presses de l'Université Paris-Sorbonne.
- MOUNIER-KUHN Pierre-E., 1994, « Le Plan Calcul, Bull et l'industrie des composants : les contradictions d'une stratégie », *Revue Historique*, 1994, vol. 292, n° 1, p. 123-153.
- NEUMANN Cédric, 2013, *De la mécanographie à l'informatique: les relations entre catégorisation des techniques, groupes professionnels et transformations des savoirs managériaux*, Thèse de doctorat, École doctorale Économie, organisations, société, Nanterre, 612 p.
- NEUMANN Cédric, PETITGIRARD Loïc et PALOQUE-BERGÈS Camille, 2016, « Le Cnam : un lieu d'accueil, de débat et d'institutionnalisation pour les sciences et techniques de l'informatique », *Technique et Science Informatiques*, 2016, vol. 35, n° 4-5, p. 584-600.
- NEUMANN John VON, 1947, « The Mathematician » dans Robert B. Heywood (ed.), *The Works of the Mind*, Chicago, Chicago University Press.
- NICOLI David F., BARRETT Paul H. et ELINGS Virgil B., 1978, « Masters in instrumentation », *Physics Today*, 1978, vol. 31, n° 9, p. 9.
- NIETZSCHE Friedrich, 1900, *La Généalogie de la morale*, traduit par Henri Albert, Paris, Mercure de France,.
- ORWELL George, 1948, *1984*, Australia, Project Gutenberg of Australia eBook.
- O'SULLIVAN J. D., EKKERS R. D. et SHAVER P. A., 1978, « Limits on cosmic radio bursts with microsecond time scales », *Nature*, 7 décembre 1978, vol. 276, p. 590.
- OWENS Larry, 1986, « Vannevar Bush and the Differential Analyzer: The Text and Context of an Early Computer », *Technology and Culture*, 1 janvier 1986, vol. 27, n° 1, p. 63-95.
- PALOQUE-BERGÈS Camille, 2017, « Mapping a French Internet experience: a decade of Unix networks cooperation (1983-1993) » dans G. Goggin et M. McLelland (eds.), *Routledge Companion to Global Internet Histories*, London, Routledge, p. 153-170.
- PALOQUE-BERGÈS Camille et PETITGIRARD Loïc, 2017, « L'Équipe Systèmes (1975-1980) et la genèse de la recherche en informatique au Cnam », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2017, vol. 7-8 (I), p. 25-56.

PALOQUE-BERGES Camille, PETITGIRARD Loïc et NEUMANN Cédric, 2016, « “J’ai eu une carrière à l’envers” : entretien avec Claude Kaiser, titulaire de la chaire d’informatique-programmation du Conservatoire national des arts et métiers », *TSI*, 2016, vol. 35, n° 4-5, p. 557-570.

PATTERSON A. L., 1962, « Experiences in Crystallography - 1924 to Date in “Fifty years of X-ray diffraction: dedicated to the International Union of Crystallography on the occasion of the commemoration meeting in Munich, July 1962” », Utrecht, International Union of Crystallography.

PATTERSON A. L., 1927, « Über das Gibbs-Ewaldsche reziproke Gitter und den dazugehörigen Raum », *Zeitschrift für Physik*, 1 août 1927, vol. 44, n° 8, p. 596-599.

PATTERSON A. L. et TUNELL G., 1942, « A method for the summation of the Fourier series used in the X-ray analysis of crystal structure », *American Mineralogist*, 1942, vol. 10, p. 655-679.

PAUMIER Anne-Sandrine, 2016, « Laurent Schwartz (1915-2002) et le colloque d’analyse harmonique de Nancy, 15-22 juin 1947 », *Gazette des mathématiciens*, 2016, vol. 147, p. 39–51.

PAUMIER Anne-Sandrine, 2014, *Laurent schwartz (1915-2002) et la vie collective des mathématiciens*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

PENICAUD Alain, 2018, *Les cristaux, fenêtres sur l’invisible*, Paris, Ellipses, 110 p.

PEPINSKY Ray, 1952, *Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis: report of a conference held at the Pennsylvania State College, April 6-8, 1950*, Pennsylvania State College, X-ray Crystal Analysis Laboratory, Dept. of Physics, 390 p.

PEPINSKY Ray, ROBERTSON John Monteath et SPEAKMAN James Clare (eds.), 1961, *Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis: report of a conference held at Glasgow, august 1960*, New York, Pergamon Press, 326 p.

PERRIER Alain, 1975a, « Etude physique de l’évapotranspiration dans les conditions naturelles. Expression et paramètres donnant l’évapotranspiration réelle d’une surface mince », *Annales agronomiques*, 1975, vol. 26, p. 105-123.

PERRIER Alain, 1975b, « Etude physique de l’évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux », *Annales agronomiques*, 1975, vol. 26, p. 229-243.

PERRIER Alain, ARCHER P. et BLANCO DE PABLOS A., 1974, « Etude de l’évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures: dispositif et mesures », *Annales agronomiques*, 1974, vol. 25, p. 697-731.

PERRIER Alain, ITIER B, BERTOLINI J et BLANCO DE PABLOS A., 1975, « Mesure automatique du bilan d’énergie d’une culture », *Annales agronomiques*, 1975, vol. 26, p. 19-40.

PERRIER Alain, ITIER B., BERTOLINI J.M. et NADER Katerji, 1976, « A new device for continuous recording of the energy balance of natural surfaces », *Agricultural Meteorology*, 1 février 1976, vol. 16, p. 71-84.

PERUTZ Max F., 1997, *Science is not a quiet life: unravelling the atomic mechanism of haemoglobin*, London, Imperial College press, 636 p.

PERUTZ Max F., 1949, « An X-ray study of horse methaemoglobin. II », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 3 février 1949, vol. 195, n° 1043, p. 474-499.

PESTRE Dominique, 2010, « La création de la DMA et de la DRME en 1961 : projet politique stratégique ou construction conjoncturelle ? » dans *Le gouvernement de la recherche*, Paris, La Découverte, p. 163-173.

PESTRE Dominique, 2006, *Introduction aux Science Studies*, Paris, La Découverte, 122 p.

PETITGIRARD Loïc, 2019, « Biographie de l'ordinateur R2E-Micral, ou comment faire exister un « micro-ordinateur » dans les années 1970s (accepté pour publication) », *Technologie et innovation*, 2019, A paraître.

PETITGIRARD Loïc, 2018a, « Machines analogiques et mathématiques des systèmes dynamiques. Le groupe de « Dynamique théorique » de Théodore Vogel à Marseille (France), 1948-1964 », *Revue de Synthèse*, 2018, 139/3-4, p. 319-351.

PETITGIRARD Loïc, 2018b, « “Hacker” et collaborer : dispositifs pour la formation de médiateurs culturels des sciences et techniques. », *TREMA*, 2018, n° 48, p. 97-118.

PETITGIRARD Loïc, 2018c, « Compte-rendu de l'ouvrage de Charles Care, “Technology for Modeling Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing”, Springer, 2010 », *Revue de Synthèse*, 2018, vol. 139, p. 407-410.

PETITGIRARD Loïc, 2015, « L'ingénieur Nicolas Minorsky (1885–1970) et les mathématiques pour l'ingénierie navale, la théorie du contrôle et les oscillations non linéaires », *Revue d'Histoire des mathématiques*, 2015, 21 (2), p. 173-216.

PETITGIRARD Loïc, 2014, « Les lectures scientifiques du changement et de l'incertitude : une perspective historique » dans Durance Philippe et Monti Régine (eds.), *Mélange - Prospective stratégique*, Paris, Odile Jacob.

PETITGIRARD Loïc, 2007, « Poincaré, le chaos, quels liens ? », *Vrin*, 2007, n° 24, (coll. « Recherches sur la philosophie et le langage »).

PETITGIRARD Loïc, 2004, *Le chaos: des questions théoriques aux enjeux sociaux : philosophie, épistémologie, histoire et impact sur les institutions : (1880-2000)*, Thèse de doctorat, Université Lumière, Lyon, 711 p.

PHILLIPS Vivian J, 1987, *Waveforms : a history of early oscillography*, Bristol, A. Hilger.

PICARD Jean-François, 1990, *La république des savants : la recherche française et le CNRS*, Paris, Flammarion, 339 p.

PICKERING Andrew, 1995, *The mangle of practice: time, agency, and science*, Chicago, University of Chicago Press, 281 p.

PICKERING Andrew (ed.), 1992, *Science as practice and culture*, Chicago, University of Chicago Press, 474 p.

PIER Jean-Paul, 1992, « De l'analyse de Fourier à l'analyse harmonique », *Cahiers du séminaire d'histoire des mathématiques*, 1992, Série 2, tome 2, p. 1-11.

PIER Jean-Paul, 1990, *L'analyse harmonique: son développement historique*, Paris, Masson, 330 p.

PINARD Jacques, 1968, *Réalisation d'un spectromètre par transformation de Fourier à très haut pouvoir de résolution*, Thèse de doctorat, Université de Paris. Faculté des sciences, Paris.

PLANCHEREL Michel, 1910, « Contribution à l'étude de la représentation d'une fonction arbitraire par les intégrales définies », *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 1910, vol. 30, p. 298-335.

- POINCARÉ Henri, 1904, *La valeur de la science*, Paris, Ernest Flammarion, 278 p.
- POINCARÉ Henri, 1902, *La science et l'hypothèse*, Paris, Ernest Flammarion, 284 p.
- POINCARÉ Henri, 1895, *Théorie analytique de la propagation de la chaleur: leçons professées pendant le premier semestre 1893-1894*, Paris, G. Carré, 316 p.
- POINCARÉ Henri, 1890, « Sur les Equations aux Dérivées Partielles de la Physique Mathématique », *American Journal of Mathematics*, 1890, vol. 12, n° 3, p. 211-294.
- POLLOCK Donald K., KOESTER Charles J. et TIPETT James T. (eds.), 1963, *Optical Processing of Information: proceedings of the Symposium on Optical Processing of Information held in Washington, October 23 & 24, 1962*, Baltimore, Spartan Books, 286 p.
- PRESTON Kendall, 1972, *Coherent optical computers*, New York, McGraw-Hill, 315 p.
- PRITCHARD J. L., BULLARD A., SAKAI H. et VANASSE G. A., 1967, « IDEALAB Fourier Transform Analog Computer », *Le Journal de Physique Colloques*, 1 mars 1967, vol. 28, n° C2, p. C2-67-C2-72.
- PROWN Jules David, 1982, « Mind in Matter: An Introduction to Material Culture Theory and Method », *Winterthur Portfolio*, 1 avril 1982, vol. 17, n° 1, p. 1-19.
- PUCHTA S., 1996, « On the Role of Mathematics and Mathematical Knowledge in the Invention of Vannevar Bush's Early Analog Computers », *IEEE Annals of the History of Computing*, 1996, vol. 18, n° 4, 1996 p. 49-59.
- RABARDEL Pierre, 1995a, *Les hommes et les technologies: approche cognitive des instruments contemporains*, Paris, A. Colin, 239 p.
- RABARDEL Pierre, 1995b, « Qu'est-ce qu'un instrument ? appropriation, conceptualisation, mises en situation », *CNDP-DIE*, 1995, Mars 1995, p. 61-65.
- RAMSAY I.W., LIPSON H. et ROGERS D., 1952, « An electrical analogue machine for Fourier synthesis » dans R. Pepinsky (ed.), *Computing methods and the phase problem in X-ray crystal analysis*, Pennsylvania State College, Dept. of Physics, p. 130-132.
- RAMUNNI Girolamo, 1995, *Les sciences pour l'ingénieur: histoire du rendez-vous des sciences et de la société*, Paris, CNRS Éditions, 150 p.
- RAYLEIGH, Lord, 1912, « XCII. Remarks concerning Fourier's theorem as applied to physical problems », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1 décembre 1912, vol. 24, n° 144, p. 864-869.
- RAYLEIGH, Lord, John William Strutt, 1877, *The theory of sound*, London, Macmillan.
- REID Constance, 1986, *Hilbert-Courant*, New York, Springer-Verlag, 547 p.
- RESWEBER Jean-Paul, 2011, « Les enjeux de l'interdisciplinarité », *Questions de communication*, 30 juin 2011, n° 19, p. 171-200.
- REY Anne-Lise, 2013, *Méthode et histoire : quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?*, Paris, Classiques Garnier, 513 p.
- REYNAUD Marie-Hélène, 1991, *Auguste Bravais de la Laponie au Mont-Blanc*, Annonay, Editions du Vivarais, 236 p.
- RHEINBERGER Hans-Jörg, 1997, *Toward a History of Epistemic Things: Synthesizing Proteins in the Test Tube*, 1 édition., Stanford, Calif, Stanford University Press, 340 p.

- RICE John R., 1967, « On the Construction of Polyalgorithms for Automatic Numerical Analysis - Symposium on Interactive Systems for Experimental Applied Mathematics », New York, Proceedings of the Association for Computing Machinery.
- RICHARDS P. L., 1964, « High-Resolution Fourier Transform Spectroscopy in the Far-Infrared », *Journal of the Optical Society of America*, 1964, vol. 54, n° 12, p. 1474-1484.
- RIDLEY Matt, 2006, *Francis Crick: discoverer of the genetic code*, New York, Atlas Books : Harper Collins Publ., 213 p.
- RIDYARD J., 1967, « A complete Fourier spectroscopic system for the far infrared », *Journal de Physique Colloques*, 1967, vol. 28, n° C2, p. C2-62-C2-66.
- RIORDAN Michael et HODDESON Lillian, 1998, « The Transistor's Father Knew How To Tie Basic Industrial Research to Development », *Research Technology Management*, 1998, vol. 41, n° 1, p. 9-11.
- RIORDAN Michael et HODDESON Lillian, 1997, *Crystal fire: the invention of the transistor and the birth of the information age*, New York, Norton, 352 p.
- ROBERTSON B. L., 1935, « Operational Method or Circuit Analysis », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1935, vol. 54, n° 10, p. 1037-1045.
- ROBERTSON J. Monteath, 1954, « A fast digital computer for Fourier operations », *Acta Crystallographica*, 1954, vol. 7, n° 12, p. 817-822.
- ROBERTSON J. Monteath, 1948a, « Three-figure Cosine Factors for Fourier Analysis and Synthesis. Part I: A Modified Stencil Method », *Journal of Scientific Instruments*, 1948, vol. 25, n° 1, p. 28.
- ROBERTSON J. Monteath, 1948b, « Three-figure Cosine Factors for Fourier Analysis and Synthesis. Part II - A Mechanical Sorting Device », *Journal of Scientific Instruments*, 1948, vol. 25, n° 6, p. 216-218.
- ROBERTSON J. Monteath, 1936a, « Numerical and mechanical methods in double Fourier synthesis », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1936, vol. 21, n° 138, p. 176-187.
- ROBERTSON J. Monteath, 1936b, « 255. An X-ray study of the phthalocyanines. Part II. Quantitative structure determination of the metal-free compound », *Journal of the Chemical Society*, 1936, p. 1195-1209.
- ROBERTSON J. Monteath, 1935, « 136. An X-ray study of the structure of the phthalocyanines. Part I. The metal-free, nickel, copper, and platinum compounds », *Journal of the Chemical Society*, 1935, p. 615-621.
- ROLLET Laurent et NABONNAND Philippe, 2012, *Les uns et les autres... Biographies et prosopographies en histoire des sciences*, Nancy, Presses Universitaires de Lorraine, 630 p.
- ROSE J., 1948, « Machine à calculer permettant la détermination de fonctions périodiques et leur introduction dans des calculs - Applications à la sommation de séries de Fourier et au calcul des facteurs de structure en cristallographie », *Journal des Recherches du CNRS*, 1948, vol. 7, p. 139-144.
- RÖSSLER Otto et LETELLIER Christophe, 2013, « Chaos hierarchy - A review, thirty years later » dans Christophe Letellier et Robert Gilmore (eds.), *Topology and dynamics of chaos: in celebration of Robert Gilmore's 70th birthday*, Singapour, World Scientific, p. 99-122.

- ROTHBART Daniel et SLAYDEN Suzanne W., 1994, « The Epistemology of a Spectrometer », *Philosophy of Science*, 1994, vol. 61, n° 1, p. 25–38.
- RUANO-BORBALAN Jean-Claude, 2017, « La “grande standardisation” et les transformations du savoir dans les sociétés technoscientifiques », *Innovations*, 20 janvier 2017, n° 52, n° 1, p. 17-41.
- RUNGE C., 1903, « Über die Zerlegung empirisch gegebener periodischer Funktionen in Sinuswellen », *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 1903, vol. 48, p. 443-456.
- SAPOLSKY Harvey M., 1990, *Science and the Navy: the history of the Office of Naval Research*, Princeton, Princeton University Press, 142 p.
- SCHAFFER Simon, 2014, *La fabrique des sciences modernes: (XVIIe-XIXe siècle)*, Paris, Éditions du Seuil, 443 p.
- SCHIAVON Martina, 2014, *Itinéraires de la précision: géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments de précision en France, 1870-1930*, Nancy, Presses Universitaires de Lorraine, 775 p.
- SCHWARTZ Laurent, 1956, *Méthodes mathématiques de la physique*, Paris, Centre de documentation universitaire,.
- SCHWARTZ Laurent, 1955, *L'intégrale de Fourier*, Paris, Centre de documentation universitaire, 39 p.
- SEGAL Jérôme, 2003, *Le zéro et le un: histoire de la notion scientifique d'information au 20e siècle*, Paris, France, Éditions Syllepse, 890 p.
- SELLIER J.F., GUILLAUME G. et WEYMANN J.P., 1977, « Application du système d'acquisition de données Plurimat 20 en physique », *Revue de Physique Appliquée*, 1977, 12 (2), p. 447-450.
- SENECHAL Marjorie, 2007, « Hardy as Mentor », *Mathematical Intelligencer*, 2007, vol. 29, n° 1, p. 16-23.
- SHANNON C. E., 1948, « A Mathematical Theory of Communication », *Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, n° 3, p. 379-423.
- SHELL-GELLASCH Amy, 2002, « Mina Rees and the Funding of the Mathematical Sciences », *The American Mathematical Monthly*, 2002, vol. 109, n° 10, p. 873-889.
- SHINN Terry, 2007, *Research-Technology and Cultural Change: Instrumentation, Genericity, Transversality*, Oxford, The Bardwell Press, 216 p.
- SIEGMUND-SCHULTZE Reinhard, 2013, « The establishment of the notion and of the word 'applied mathematics' around 1800 », *Oberwolfach Report*, 2013, 12/2013, p. 663-665.
- SIEGMUND-SCHULTZE Reinhard, 2007, « Philipp Frank, Richard von Mises, and the Frank-Mises », *Physics in Perspective*, 2007, vol. 9, n° 1, p. 26-57.
- SIEGMUND-SCHULTZE Reinhard, 2003, « Military Work in Mathematics 1914–1945: an Attempt at an International Perspective » dans Bernhelm Booß-Bavnbek et Jens Høyrup (eds.), *Mathematics and War*, Basel, Birkhäuser, p. 23-82.
- SIEGMUND-SCHULTZE Reinhard et BARROW-GREEN June, 2015, « The history of Applied Mathematics » dans Nicholas J. Higham, Mark R. Dennis, Paul Glendinning et Paul A. Martin (eds.), *The Princeton companion to applied mathematics*, Princeton, p. 55-79.
- SIMONDON Gilbert, 1958, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 265 p.

SISMONDO Sergio, 2010, *An introduction to science and technology studies*, Malden, Wiley-Blackwell, 244 p.

SMALL James S., 2001, *The Analogue Alternative: The Electronic Analogue Computer in Britain and the USA, 1930-1975*, London, Routledge, 340 p.

SNYDER Frances E. et LIVINGSTON Hubert M., 1949, « Coding of a Laplace Boundary Value Problem for the UNIVAC », *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, 1949, vol. 3, n° 25, p. 341-350.

SOKAL Alan D. et BRICMONT Jean, 1997, *Impostures intellectuelles*, Paris, Odile Jacob, 276 p.

SOLCOVA Alena et KRÍZEK Michal, 2011, « Vladimir Vand (1911-1968): Pioneer of Computational Methods in Crystallography », *IEEE Annals of the History of Computing*, 2011, vol. 33.

STEWART Ian, 1989, *Does God play dice? The mathematics of chaos*, Oxford, Blackwell, 317 p.

STOKES Alexander R., 1946, « The construction and use of a “fly’s eye” for assisting X-ray structure analysis », *Proceedings of the Physical Society*, mai 1946, vol. 58, n° 3, p. 306–313.

STROKE G. W., BRUMM D. et FUNKHOUSER A., 1965, « Three-Dimensional Holography with “Lensless” Fourier-Transform Holograms and Coarse P/N Polaroid Film », *Journal of the Optical Society of America*, 1 octobre 1965, vol. 55, n° 10, p. 1327-1328.

STROKE G. W. et FUNKHOUSER A. T., 1965, « Fourier-transform spectroscopy using holographic imaging without computing and with stationary interferometers », *Physics Letters*, 1 juin 1965, vol. 16, n° 3, p. 272-274.

STROKE G. W., RESTRICK R., FUNKHOUSER A. et BRUMM D., 1965, « Resolution-retrieving compensation of source effects by correlative reconstruction in high-resolution holography », *Physics Letters*, 1 septembre 1965, vol. 18, n° 3, p. 274-275.

STROKE George W., 1967, « Spectroscopic implications of new holographic imaging methods », *Physica*, 1 janvier 1967, vol. 33, n° 1, p. 253-267.

STRONG J., 1984, « Fourier transform spectroscopy reminiscences », *Infrared Physics*, 1 mai 1984, vol. 24, n° 2, p. 103.

STRONG J. et VANASSE G. A., 1958, « Modulation interférentielle et calculateur analogique pour un spectromètre interférentiel », *Le Journal de Physique et Le Radium*, 1958, vol. 19, p. 192-196.

STRONG John, 1957, « Interferometry for the Far Infrared », *Journal of the Optical Society of America*, 1 mai 1957, vol. 47, n° 5, p. 354-357.

SULLIVAN W. T. (ed.), 1984, *The early years of radioastronomy: reflections fifty years after Jansky’s discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, 421 p.

TAUB Liba, 2011, « Introduction: Reengaging with Instruments », *Isis*, 2011, vol. 102, n° 4, p. 689-696.

TAYLOR C. A., HINDE R. M. et LIPSON H., 1951, « Optical methods in X-ray analysis. I. The study of imperfect structures », *Acta Crystallographica*, 2 mai 1951, vol. 4, n° 3, p. 261-266.

TAZZIOLI Rossana, 2001, « Green’s Function in Some Contributions of 19th Century Mathematicians », *Historia Mathematica*, 1 août 2001, vol. 28, n° 3, p. 232-252.

TEN EYCK L. F., 1973, « Crystallographic fast Fourier transforms », *Acta Crystallographica Section A*, 1973, vol. 29, n° 2, p. 183-191.

THOMPSON Silvanus P, 1910, *Calculus made easy: being a very-simplest introduction to those beautiful methods of reckoning which are generally called by the terrifying names of the differential calculus and the integral calculus*, London, Macmillan and Co.

TIMOSHENKO Stephen, 1928, *Vibration Problems in Engineering*, New York, Van Nostrand, 351 p.

TOBIES Renate, 2017, « From academic to practical areas in Germany: The use and development of mathematical instruments in the first decades of the 20th century », *Oberwolfach Report*, 2017, n° 58, p. 3540-3543.

TOBIES Renate, 2012, *Iris Runge: A Life at the Crossroads of Mathematics, Science, and Industry*, Basel, Birkhäuser.

TOURNES Dominique, 2016, *Abaques et nomogrammes*, [URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01484563>], 2016, consulté le 25 mars 2019.

TOURNÈS Dominique, 2015, « Models and visual thinking in physical applications of differential equation theory: three case studies during the period 1850–1950 (Bashforth, Størmer, Lemaître) », *Oberwolfach Report*, 2015, n° 47, p. 2846-2848.

TOURNÈS Dominique, 2014, « Mathematics of nomography » dans *Mathematik und Anwendungen*, Jena, Bad Berka Thillm, p. 26-32.

TROUCHE Luc, 2005, « Des artefacts aux instruments, une approche pour guider et intégrer les usages des outils de calcul dans l'enseignement des mathématiques », Saint-Flour, Actes de l'Université d'été de Saint-Flour (août 2005) - « Le calcul sous toutes ses formes ».

TUKEY John Wilder, 1984, « The sampling theory of power spectrum estimates » dans David R. Brillinger (ed.), *The Collected works of John W. Tukey. Vol. I, Time series: 1949-1964*, Belmont, Wadsworth Advanced Books, p. 129-160.

TURING A. M., 1953, « Some Calculations of the Riemann Zeta-Function », *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1953, vol. s3-3, n° 1, p. 99-117.

TURING A. M., 1945, « A Method for the Calculation of the Zeta-Function », *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1945, vol. s2-48, n° 1, p. 180-197.

TURNER Fred, 2006, *From counterculture to cyberculture: Stewart Brand, the Whole Earth Network, and the rise of digital utopianism*, Chicago, University of Chicago Press, 327 p.

TYMOCZKO Thomas, 1998, « The Four-Color Problem and Its Philosophical Significance » dans *New directions in the philosophy of mathematics: an anthology*, Princeton, Princeton University Press, p. 243-266.

TYMPAS Aristotle, 2017, *Calculation and Computation in the Pre-electronic Era: The Mechanical and Electrical Ages*, London, Springer-Verlag (coll. « History of Computing »).

UEDA Yoshisuke, ABRAHAM Ralph H. et STEWART Bruce H., 1992, *The road to chaos*, Santa Cruz, CA, Aerial Press, 223 p.

ULAM Stanislaw Marcin, 1976, *Adventures of a mathematician*, New York, Etats-Unis d'Amérique, Scribner, 317 p.

VAN KERKHOVE Bart, DE VUYST Jonas et VAN BENDEGEM Jean Paul (eds.), 2010, *Philosophical perspectives on mathematical practice*, London, College Publications, 356 p.

VAND Vladimir, 1951, « Magnifying 100 Million Times », *The Meccano Magazine*, 1951, vol. 36, p. 247.

- VAND Vladimir, 1950, « A Mechanical X-Ray Structure-Factor Calculating Machine », *Journal of Scientific Instruments*, 1950, vol. 27, n° 10, p. 257.
- VAND Vladimir et PEPINSKY Ray, 1953, *The statistical approach to X-ray structure analysis*, Pennsylvania State University, Dept. of Physics, 98 p.
- VARENNE Franck, 2007, *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, J. Vrin, 249 p.
- VELZEL C.H.F., 1972, « Inverse Fourier Spectroscopy. Part I: Theory », *Philips research reports*, 1972, vol. 27, n° 4, p. 297.
- VIETORIS L., 1951, « Zum Gebrauch des harmonischen Analysators von Mader-Ott », *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1951, vol. 31, n° 6, p. 179-181.
- VIGNAUX Paul, 1963, « Alexandre Koyré (1892-1964) », *Annales de l'École pratique des hautes études*, 1963, vol. 76, n° 72, p. 43-49.
- VILLANI Cédric, 2012, *Théorème vivant*, Paris, Librairie générale française, 308 p.
- WARNER Deborah Jean, 1990, « What is a scientific instrument, when did it become one, and why? », *The British Journal for the History of Science*, mars 1990, vol. 23, n° 1, p. 83-93.
- WEISSERT Thomas P., 1997, *The genesis of simulation in dynamics: pursuing the Fermi-Pasta-Ulam problem*, New York, Springer, 176 p.
- WELARATNA Sri, 1997, « Thirty Years of FFT Analyzers », *Sound and Vibration*, 1997, n° 1, p. 1-5.
- WERRETT S., 2014, « Matter and facts: material culture in the history of science » dans R. Chapman et A. Wylie (eds.), *Material evidence: learning from archaeological practice*, New York, Routledge, p. 339-352.
- WIENER Norbert, 1949, *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series: with engineering applications*, Cambridge, Technology Press of the MIT, 163 p.
- WIENER Norbert, 1948, *Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine*, Cambridge, The Technology Press, 194 p.
- WIENER Norbert, 1933, *The Fourier integral and certain of its applications*, Cambridge, Cambridge University Press, 201 p.
- WIENER Norbert, 1930, « Generalized harmonic analysis », *Acta Mathematica*, 1930, vol. 55, p. 117-258.
- WIENER Norbert, 1921, « The Average of an Analytic Functional and the Brownian Movement », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1921, vol. 7, n° 10, p. 294-298.
- WIGNER Eugene P., 1960, « The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. Richard Courant lecture in mathematical sciences delivered at New York University, May 11, 1959 », *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1960, vol. 13, n° 1, p. 1-14.
- WILKES Maurice, 1985, *Memoirs of a Computer Pioneer*, Cambridge, Massachusetts Institute of Technology.
- WILKES Maurice V., WHEELER David J. et GILL Stanley, 1951, *The preparation of programs for an electronic digital computer: with special reference to the EDSAC and the use of a library of subroutines*, Cambridge, Addison-Wesley Press, 167 p.

WILKINSON James Hardy et REINSCH C., 1971, *Handbook for automatic computation*, Berlin, Springer-Verlag, 439 p.

WILLIS B. T. M., 1957a, « An optical method of studying the diffraction from imperfect crystals I. Modulated structures », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 26 février 1957, vol. 239, n° 1217, p. 184-191.

WILLIS B. T. M., 1957b, « An optical method of studying the diffraction from imperfect crystals II. Crystals with dislocations », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 26 février 1957, vol. 239, n° 1217, p. 192-201.

WOOD A. B., 1925, « The cathode-ray oscillograph », *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1925, vol. 63, n° 347, p. 1046-1055.

WRINCH Dorothy, 1946, *Fourier transforms and structure factors*, Cambridge, American Society for X-Ray and Electron Diffraction.

YOSHINAGA H., 1964, « Recent Techniques in Far Infrared Spectroscopy », *Japanese Journal of Applied Physics*, 1 janvier 1964, vol. 3, n° S1, p. 420.

YOSHINAGA Hiroshi, FUJITA Shigeru, MINAMI Shigeo, SUEMOTO Yoshiro, INOUE Masaru, CHIBA Kazuo, NAKANO Kaoru, YOSHIDA Shigeru et SUGIMORI Hideo, 1966, « A Far Infrared Interferometric Spectrometer with a Special Electronic Computer », *Applied Optics*, 1 juillet 1966, vol. 5, n° 7, p. 1159-1165.

Annexes

LISTE DES ANNEXES

Programme de la Journée d'études « Articuler histoire des sciences et des techniques, formation de professionnels et édition en ligne : quels dispositifs hybrides, pour quels objets ? » - 31 mars 2016	Page 312
Journée d'étude « La métrologie au Conservatoire national des arts et métiers au cours des « Trente Glorieuses » - 17 octobre 2013	Page 314
Programmes des Séminaires d'histoire des mathématiques sur « Les instruments scientifiques comme porteurs de savoir mathématique ? » - 2017-2019	Page 315
Programme du Colloque « Systèmes d'exploitation : un tournant dans l'histoire de l'informatique » - 15 novembre 2016	Page 321
Programme du Colloque international « Unix en Europe : entre innovation, diffusion et appropriation » - 19 octobre 2017	Page 324
Sommaire des Cahiers d'histoire du Cnam n° 7-8	Page 326
Liste des notices du futur <i>Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam (1945-1975)</i>	Page 328
Notice biographique d'André Allisy	Page 331
Notice biographique de Maurice Bellier	Page 342
Notice biographique de Jean Girerd	Page 350
Notice biographique de René Chenon	Page 359
Notice « Infra-red spectroscopy » (à paraître dans <i>Tools in Materials Research</i>, Cyrus Mody, Joseph D. Martin (eds.))	Page 363
Graphiques de « n-gram » au sujet de l'analyse de Fourier	Page 373

Annexe – Programme de la Journée d'études « Articuler histoire des sciences et des techniques, formation de professionnels et édition en ligne : quels dispositifs hybrides, pour quels objets ? » - 31 mars 2016

Organisateurs : Loïc Petitgirard, (CNAM, HT2S), Alain Bernard (UPEC-ESPE, Centre A. Koyré)

Argumentaire scientifique :

Cette journée d'étude se fonde sur l'examen comparatif de cinq dispositifs de formation professionnelle développés dans des contextes et pour des publics *a priori* très différents: l'atelier « la lucarne » développé au CNAM en lien avec une formation pour médiateurs scientifiques, par Michel Letté et Loïc Petitgirard ; les Ateliers de médiation numérique, dans la même formation au CNAM, reposant sur le “détournement” de dispositif d'éditions existants, à visée de croisement d'expertise sur des objets du Musée du Cnam (Loïc Petitgirard) ; le projet MEDFILM développé à l'université de Strasbourg par Christian Bonah et ses collègues, en liens à plusieurs cours associés, dont des formations professionnelles pour médecins; un groupe « épistémologie et histoire » expérimenté en 2015-16 à l'IREM de Paris Nord en partenariat avec l'ESPE de Créteil pour des enseignants en formation initiale ou continue (A. Bernard, K. Gosztonyi), enfin le dispositif éditorial mis en place par Muriel Guedj et ses collègues à l'université de Montpellier pour accompagner l'exposition « regard croisés sur la lumière » mise en place localement pour l'Année Internationale de la Lumière.

Malgré la diversité évidente des contextes, des objets et des objectifs, on peut faire le constat qu'ils ont un point commun évident : tous combinent, d'une manière ou d'une autre, des recherches en histoire des sciences et des techniques sur des objets variés; une démarche d'édition en ligne, sous la forme de la mise en ligne de travaux d'experts et/ou d'étudiants, sur un espace numérique dédié, enfin une démarche de formation professionnelle. Au-delà de cette similitude, nous faisons l'hypothèse que leur conception raisonnée partage des caractéristiques plus fondamentales, qui sont pensables à partir de différents concepts ou problématiques nouvelles que nous aimerions mettre à l'épreuve de la comparaison. L'enjeu de la rencontre est donc à la fois pratique (enrichir et renforcer chaque dispositif par la comparaison et la mutualisation de pratiques) et théorique (se donner les moyens de penser aux enjeux de ces dispositifs).

Programme

9h15 - Introduction de la journée : A. Bernard et L. Petitgirard

9h30 - 11h

- Christian Bonah (Université de Strasbourg) – « *Le projet MEDFILM : le film « utilitaire » pour la formation, et par la recherche, en SHS en milieu médical* ».
- K. Gosztonyi et A. Bernard (Université Paris-Est Créteil et ESPE) : « *Combiner recherche en histoire des mathématiques et formation professionnelle des enseignants : la mise en place expérimentale d'un nouveau groupe IREM* »
- Muriel Guedj (LIRDEF- Université de Montpellier) : *L'exposition "Regards croisés sur la lumière", De la conception de projet au dispositif de formation : des expertises à croiser.*

Discussion : Lisa Chupin (Cnam, DICEN), Loïc Petitgirard

Pause

11h30-12h30

- Michel Letté (Cnam) - « *La Lucarne* », un dispositif hybride autour de l'ordinaire des Sciences et techniques en Société.
- Loïc Petitgirard (Cnam) - « *Hacker* » pour collaborer : détournement de dispositifs d'édition pour la formation de Médiateurs

Discussion : Alain Bernard, Katalin Gosztanyi

12h30 - 14h - Déjeuner libre

14h - 16h : *Table Ronde* : enjeux pratiques et théoriques des dispositifs présentés

Pause

16h15-17h30 : Atelier restreint - Synthèse et perspectives. Modalités de publication.

Annexe – Journée d'étude « La métrologie au Conservatoire national des arts et métiers au cours des « Trente Glorieuses » - 17 octobre 2013

5^e Rencontre autour du dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam organisée par Claudine FONTANON (EHESS/Centre Alexandre Koyré/HT2S-Cnam), André GRELON (EHESS/Centre Maurice Halbwachs) et Loïc PETITGIRARD (HT2S-Cnam)

Rencontre organisée avec le concours du laboratoire HT2S (Cnam) et du Centre Alexandre Koyré (EHESS/CNRS)

CNAM - 2 rue Conté 75003 Paris (M^o Arts et Métiers / Réaumur Sébastopol)

Jeudi 17 octobre 2013 – 14h à 18h

L'activité de métrologie au Cnam et ses rapports avec l'organisation de la métrologie française sont les fruits d'une longue histoire, initiée à l'époque de la Révolution française. Conservation des étalons, création du LNE, premiers enseignements de métrologie ont été les préliminaires à la création d'un pôle de recherche et de formation à la métrologie, durant les Trente Glorieuses. Cette demi-journée s'attachera à analyser ce tournant pris avec la création de l'Institut national de métrologie et de la chaire de Métrologie au Cnam à partir de 1967. À travers analyses et témoignages, il s'agit d'interroger les ambitions, évolutions et succès de l'activité métrologique au Cnam, et de préciser le rôle du Cnam dans les développements contemporains de la métrologie française.

Programme

Présidence de séance : André GRELON (directeur d'études EHESS)

14h-14h20 « Introduction - Le Cnam et la métrologie, une longue histoire »

Claudine FONTANON (Maître de conférences/ EHESS / HT2S-Cnam)

14h20-15h « Le Cnam et le renouveau de la métrologie en France, 1965-1975 »

Loïc PETTIGIRARD (Maître de conférences/ HT2S-Cnam)

15h-15h40 « L'aventure de la photométrie à l'Institut National de Métrologie »

Jean BASTIE (Ingénieur honoraire, chef du service de radiophotométrie/ INM-Cnam)

15h40 - Discussion sur les premières interventions

16h- Pause café

16h20-17h00 « Le Cnam et le LNE en métrologie : je t'aime, moi non plus ? »

Marc HIMBERT (Professeur, directeur du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam/ LCM-Cnam)

17h00 -17h40 « Les enseignements de métrologie, depuis 1967 »,

Michel LECOLLINET (Maître de conférences honoraire/ chaire de métrologie et INM, Cnam)

17h40-18h00 « Discussion générale », Loïc PETITGIRARD, modérateur

Annexe – Programme du Séminaire d’histoire des mathématiques sur « Les instruments scientifiques comme porteurs « de savoir » mathématique ? Quelques explorations » - 2017-2019

Les instruments scientifiques comme porteurs « de savoir » mathématique ?

Quelques explorations

Institut Henri Poincaré 9 juin 2017

14h-16h

Séance organisée par Maarten Bullynck (Université Vincennes St Denis - Paris 8) et Martina Schiavon (L.H.S.P. – Archives Henri Poincaré UMR 7117 CNRS, Université de Lorraine)

Qu’il s’agisse des sciences expérimentales ou mathématiques, la question de l’étude des instruments a été profondément renouvelée au cours de ces dernières années, grâce notamment à une plus grande attention portée par les historiens vers les *lieux* du travail mathématique – en particulier l’observatoire astronomique, les bureaux des calculs et le terrain – ainsi que les *acteurs* impliqués dans ce travail – du mathématicien pur à l’ingénieur, de l’inventeur et financeur jusqu’à son utilisateur.

Qu’entendons-nous par « instrument scientifique » et « *mathématique ou des mathématiques* » en particulier ? Comment mener une étude de ces objets en tant qu’historiens ?

Cette séance n’a pas pour ambition donner une réponse à toutes ces questions : à travers deux études de cas spécifiques, elle vise plutôt à mener une réflexion autour de quelques nouvelles pratiques de l’histoire afin de mettre en évidence les « relations mutuelles et réciproques » entre l’instrument conçu comme *objet et donc porteur des pratiques* et l’*objet porteur d’un savoir*. Selon nous, l’articulation de ces questions est essentielle dans l’étude des instruments et, en particulier, des instruments *mathématiques* : la considération des relations mutuelles entre objet et lieu, objet et acteur impliqué, objet et son usage, nous permet de mieux préciser l’importance des actions matérielles et des gestes d’une part, des négociations de sens entre spécialistes de l’autre.

Programme :

14h-14h45 :

Marie-José Durand-Richard (Chercheuse associée SPHERE UMR 7219 CNRS – Paris Diderot)

Du marégraphe à l’analyseur harmonique : l’indispensable recours aux instruments dans la prédiction des marées.

Dans sa *Mécanique Céleste*, Pierre Simon de Laplace (1748-1827) développe une conception dynamique et un traitement analytique du mouvement des marées qui vont servir de base à leur prédiction pour les deux siècles à venir. Mais cette théorisation, obtenue au

prix d'approximations drastiques, a également besoin d'une étude expérimentale pour en préciser les conditions de validité dans les ports. À partir des années 1830, aussi bien au Royaume-Uni qu'en France, l'installation des marégraphes, qui inaugure l'enregistrement en continu de la hauteur d'eau, permet d'étendre l'analyse des marées bien au-delà des côtes Est de l'Atlantique. Dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle, elle sera complétée par deux instruments plus complexes, élaborés par William Thomson (1824-1907), le futur Lord Kelvin, et son frère ingénieur James (1822-1892) : « l'analyseur harmonique », qui permet d'obtenir les premiers coefficients de Fourier de la courbe périodique enregistrée par le marégraphe, et le « prédicteur de marées », qui permet de combiner les composantes de marées ainsi analysées.

Cet exposé insistera sur l'indispensable coopération entre opérateurs, ingénieurs, et mathématiciens que suppose la mise en œuvre de ces instruments, soutenue par des institutions tant scientifiques que politiques.

14h45-15h00 : questions ponctuelles sur l'exposé de Marie-José Durand-Richard

15h00-15h45 :

Frédéric SOULU (chercheur extérieur bénévole au Centre François Viète – EA 1161, Université de Nantes)

Alger 1830 : un théodolite pour combattre

Le théodolite de Gambey est l'instrument classique des ingénieurs-géographes du Dépôt de la Guerre dans la première moitié du 19^e siècle. En juin 1830, lors du débarquement de l'armée d'Afrique à Alger, il est utilisé pour déterminer la position de la ville.

Entre combats et observations, les observateurs de la brigade topographique, formés à l'École polytechnique, s'appuient sur plusieurs éléments : un site, un ensemble d'objets liés au théodolite, et des relations avec d'autres groupes sur place et à distance.

Cet instrument participe alors de la mise en place de la domination coloniale et de la prise de possession de cet espace nord-africain par les Français.

15h45-16h00 : questions ponctuelles sur l'exposé de Frédéric Soulu

16h00-16h30 : pause-café

16h30 – 18h00 : Table ronde et discussion : Maarten Bullynck, Martina Schiavon et Loïc Petitgirard (CNAM).

**Les instruments scientifiques comme porteurs « de savoir » mathématique ?
Transformations et défis du XXe siècle - Institut Henri Poincaré 6 avril 2018**

Séance organisée par Maarten Bullynck (Université Vincennes St Denis - Paris 8), Martina Schiavon Archives Henri Poincaré UMR 7117 CNRS, Université de Lorraine) et Loïc Petitgirard (CNAM – Laboratoire HT2S)

Cette séance poursuit la réflexion sur les instruments scientifiques et leurs relations avec les mathématiques, 19^e – début 20^e siècle (cf. séance 9 juin 2017). Nous nous interrogeons sur les nouvelles pratiques de l'histoire afin de mettre en évidence les « relations mutuelles et réciproques » entre l'*instrument* conçu comme *objet et donc porteur des pratiques* et l'*objet porteur d'un savoir*. Selon nous, l'articulation de ces questions est essentielle dans l'étude des instruments et, en particulier, des instruments *mathématiques* : la considération des relations mutuelles entre objet et lieu, objet et acteurs impliqués, objet et son usage, nous permet de mieux préciser l'importance des actions matérielles et des gestes d'une part, des négociations de sens entre spécialistes de l'autre.

La séance se concentre sur les évolutions d'après la deuxième Guerre Mondiale, quand un ensemble de pratiques du début du XXe siècle, comme les bureaux de calcul, les machines analogiques ou encore les pratiques de mesure, se transforment avec l'avènement de la machine généraliste qu'est l'ordinateur digital. Cette transformation ne se fait pas soudainement, mais se situe dans une pluralité de traditions qui lentement s'intègrent dans une nouvelle pratique, qui va de pair avec des discussions et interrogations sur le statut des objets et sur les méthodes du savoir mathématique ainsi développé.

Programme :

14h15-15h15 -Pierre Mounier-Kuhn (EHESS): *Offre et demande de calcul*

Dans cet exposé, j'appliquerai à nos questions d'histoire des sciences une grille d'analyse importée de l'histoire économique. Partant du constat que la France est le seul pays industrialisé où la recherche publique ne construit aucun ordinateur à l'époque « pionnière », avant 1960, je l'explique par la faiblesse initiale de la demande de calcul, autant que par la rareté des compétences en « calcul mécanique », comme on disait alors.

Dans l'entre-deux-guerres comme dans la période de reconstruction, on constate que les laboratoires français, comparés à leurs équivalents des pays les plus développés, sont faiblement équipés en matériels de calcul. Les universitaires, en particulier les mathématiciens, ne sont donc pas habitués à faire appel à des équipements lourds pour le travail arithmétique. De plus, ils n'ont pas en général le réflexe de construire eux-mêmes des machines dans leurs laboratoires.

Peut-on parler d'un sous-équipement ? Oui, dans la mesure où l'appauvrissement dramatique de la recherche française au cours des années vingt a empêché les laboratoires de s'équiper. Non, car on constate ensuite que la recherche française semble avoir peu besoin de calcul : si l'équipement est faible, c'est parce qu'il correspond à un faible niveau de la demande, dans presque toutes les disciplines. Cela nous paraît confirmé, après la guerre, par l'importation de matériel scientifique allemand, qui révèle des exigences limitées en machines à calculer. Au sein même du milieu mathématicien, la domination des Mathématiques pures (qui est un phénomène historiquement daté, et non une constante "culturelle") contribue à accentuer ces particularités de la science française, en maintenant à un niveau subalterne les disciplines liées

au calcul et en favorisant une pratique “artisanale” de la recherche.

Le contexte change au cours des années cinquante. Premièrement, une nouvelle génération de physiciens, frottée aux théories récentes et aux approches américaines, importe de nouvelles pratiques scientifiques dans les laboratoires. Deuxièmement, l’art de l’ingénieur se transforme et fait de plus en plus appel à la modélisation mathématique. Troisièmement, le développement industriel et la guerre froide entraînent la mise en œuvre de grands programmes technologiques ; ceux-ci exigent d’immenses efforts en mathématiques appliquées, assortis de calculs inabordables avec les moyens traditionnels. Les possibilités d’équipement changent au même moment, du fait de l’apparition de calculateurs électroniques commerciaux. Dès le début des années 1960, la recherche publique française dispose de quelques-uns des plus grands centres de calcul européens.

15h15-16h15 - Arianna Borelli (*Technische Universität Berlin*) : The Monte Carlo in Early Particle Physics

The development of computing machines in the 20th century was profoundly shaped by U.S. American military research during the World War 2. After the war, computers came to be employed in various areas of science and technology, leading to a series of more or less radical and rapid transformations. Despite the clarity of this general picture, no common historical pattern for these developments has emerged so far, and I would like to suggest that the most productive way to historically investigate this constellation may be to try and reconstruct the situated diversity of the landscape by focusing on specific computational practices, their employment and their epistemic implications in different disciplinary fields.

From this perspective, in my contribution I will offer a case study focusing on the Monte Carlo method and its introduction into early particle physics between the late 1950s and the early 1960s. I believe this example can illustrate how, under particular historical-epistemological circumstances, a kind of symbiosis could emerge between a mathematical method and the computing machines it was implemented in. In the specific context of high energy physics around 1960, Monte Carlo computations could on the one side lead to the creation of new physical-mathematical practices and notions, while on the other eventually transform the machine performing the computation into a very special tool that would come to be seen as "simulating experiments". Although in the classical treatment by Peter Galison (1997) the Monte Carlo method has been presented as generating a sort of "artificial reality" right from the beginning in the various areas in which it was deployed, I will argue that, when looking more closely at the developments in high energy physics, a different, more nuanced picture appears. In particle physics, the transformation of numerical techniques of Monte Carlo integration into a perceived "simulation" of particle events was closely linked to the developments in the field around 1960, and the simple fact that a computer was used to implement the Monte Carlo method did not in itself imply that the computation would be seen as presenting some fundamental analogy to a physical process.

16h15-16h30 : pause-café

16h30 – 17h30 -Loïc Petitgirard (CNAM): Entre mathématiques et instrumentation : les « instruments à transformée de Fourier»

L'émergence et l'évolution de l'analyse des signaux a été poussée à la fois par le développement et l'extension des outils mathématiques de Fourier (la TF en premier lieu), et par de permanents aller-retours avec des problèmes du concret (analyse de signaux expérimentaux, instrumentation physique en spectroscopie, en optique...filtrages électroniques et systèmes de télécommunications, etc.). Dans cet exposé, on prendra le sujet du « traitement du signal » (signal processing) comme fil rouge pour montrer la co-construction et la co-évolution des théories mathématiques et des instruments conçus pour ces traitements. On choisit donc de re-positionner le « signal » entre le formel et le réel, sur le long 20^e siècle ce qui permet de se focaliser sur quelques exemples d'« instruments à transformée de Fourier » emblématiques et illustrant une co-évolution entre le formel/mathématique et le réel/technique : les développements de la spectroscopie (analyse spectrale jusqu'aux développements de la spectro infra-rouge) ; la cristallographie par rayons X ; et on indiquera quelques jalons d'une histoire des méthodes numériques de calcul de TF, permis par l'ordinateur, qui ont contribué à l'avènement et à la généralisation du « traitement numérique du signal ».

Les instruments scientifiques comme porteurs « de savoir » mathématique ? L'outillage intellectuel et ses transformations au XX^e siècle - Institut Henri Poincaré 22 mars 2019

Séance organisée par Maarten Bullynck (Université Vincennes St Denis - Paris 8), Martina Schiavon Archives Henri Poincaré UMR 7117 CNRS, Université de Lorraine) et Loïc Petitgirard (CNAM – Laboratoire HT2S)

Cette séance poursuit la réflexion sur les instruments scientifiques et leurs relations avec les mathématiques, 19^e – début 20^e siècle (cf. séance 9 juin 2017 et 6 avril 2018). Nous nous interrogeons sur les nouvelles pratiques de l'histoire afin de mettre en évidence les « relations mutuelles et réciproques » entre l'*instrument* conçu comme *objet et donc porteur des pratiques* et l'*objet porteur d'un savoir*. Selon nous, l'articulation de ces questions est essentielle dans l'étude des instruments et, en particulier, des instruments *mathématiques* : la considération des relations mutuelles entre objet et lieu, objet et acteurs impliqués, objet et son usage, nous permet de mieux préciser l'importance des actions matérielles et des gestes d'une part, des négociations de sens entre spécialistes de l'autre.

La séance se concentre cette fois-ci sur l'outillage intellectuel des mathématiques et ses applications au XX^e siècle. Si le papier et les notations mathématiques sont d'ores et déjà considérées comme les supports classiques des mathématiques, elles sont néanmoins aussi soumises aux évolutions historiques. En particulier, au XX^e siècle les pratiques d'inscrire les formes mathématiques sur le papier et leurs manipulations prennent souvent part à des régimentations et standardisations des pratiques gouvernementales, éducatives, militaires et/ou industrielles. On peut étudier le passage des utilisations individuels de formes et organisations mathématiques dans les matérialités de la pratique mathématique à l'établissement des prescriptions et formulaires destinées pour un usage collectif et fixé à l'avance. Les intervenants parleront de cette évolution dans le militaire (calcul balistique), dans l'industrie (contrôle de qualité) et dans les mathématiques mêmes (les matrices).

Programme

14h00-14h15 Introduction

14h15-15h15 Maarten Bullynck (Université Paris 8) : « Standardisation de pratiques de calcul en balistique et en industrie aux États-Unis pendant l'Entre-deux-guerres »

15h15-16h15 Denis Bayart (Ecole Polytechnique) : « Normalisation et contrôle statistique de qualité »

16h15-16h30 Pause

16h30-17h30 Frédéric Brechenmacher (LinX, Ecole Polytechnique) : « La standardisation de la théorie des matrices dans l'Entre-deux-guerres »

17h30-18h00 Discussion générale

Annexe – Programme du Colloque « Systèmes d'exploitation : un tournant dans l'histoire de l'informatique » - 15 novembre 2016

Systèmes d'exploitation : un tournant dans l'histoire de l'informatique

Mardi 15 novembre 2016
Conservatoire national des arts et métiers
292 rue Saint Martin - 75003 Paris
Amphi A

Colloque organisé au Cnam, conjointement par les équipes « Histoire de l'informatique et de la société numérique » et « Histoire / Patrimoine de l'informatique au Cnam ».

Programme

9h - Introduction générale, présentation de la journée

Isabelle Astic, Camille Paloque-Berges, Loïc Petitgirard (Cnam)

9h10 – 10h30 - Session 1 - Le projet « La genèse d'un laboratoire de recherche en informatique (1968-1988) »

Présentation, bilan et perspectives, par l'équipe « Hist.Pat.info.Cnam » (HT2S, LabEx HASTEC)

9h15 - Légitimations scientifiques d'une discipline technique : les productions scientifiques et la généalogie de la recherche en informatique au Cnam

Loïc Petitgirard (HT2S, Cnam) : « Entre formation, recherche et industrie : l'informatique au Cnam vue au travers des Mémoires d'ingénieur- Cnam »

Camille Paloque-Berges (HT2S, Cnam) : « Les publications académiques des rapports de l'Equipe Systèmes 1975-1985 : genèse de la recherche en informatique au Cnam »

9h50 - Système de traitement des données bibliographiques du projet

Pierre Cubaud (CEDRIC, Cnam) : « En quoi les systèmes informatiques ont-ils pu contribuer au travail de l'historien ? »

Gérald Kembellec (DICEN-IDF, Cnam) : « Comment récupérer et catégoriser les données au regard des systèmes de classification de la discipline qui évoluent ? »

Raphaël Fournier (CEDRIC, Cnam) : « Présentation d'un système en cours de construction. »

10h20 - Questions

10h30 - Pause

10h40 – 12h - Session 2 - Les Chaires en informatique et la recherche au Cnam : des générations successives ?

Présidente de session : Claudine Fontanon (EHESS-Centre Alexandre-Koyré)

- 10h50- Pierre Mounier-Kuhn (CNRS et Université Paris-Sorbonne) :**
« François-Henri Raymond : ingénieur, chercheur et entrepreneur du numérique »
- 11h10- Cédric Neumann (HT2S, Cnam) :** « Un professeur sans recherches : la trajectoire professionnelle de Paul Namian au Cnam »
- 11h30 - Claude Kaiser (professeur émérite, CNAM) :** « 1965-1975, 10 ans de gloire des systèmes »
- 11h50 - Questions**

Déjeuner : 12h00-13h30

13h30 – 15h - Session 3 - Aux origines des systèmes d'exploitation

Président de session : Pierre Mounier-Kuhn (CNRS et Université Paris-Sorbonne)

- 13h30 - Pierre Mounier-Kuhn (CNRS et Université Paris-Sorbonne) :** synthèse sur le symposium « Beyond ENIAC : Early Digital Platforms & Practices » (juin 2016, Siegen, Allemagne)
- 13h40 - KEYNOTE de Gerard Alberts (Université d'Amsterdam) :** « Styles of auto-coding, 1950s-1960s »
- 14h10 - KEYNOTE de Maarten Bullynck (SPHERE, Université Paris 8) :** « De l'origine des systèmes aux systèmes modernes »
- 14h45 - Questions**

15h00 - Pause

15h15 – 17h – Session 4 - Des machines aux systèmes

Présidente de session : Isabelle Astic (Musée des arts et métiers, Cnam)

- 15h15 - François Anceau (professeur émérite, CNAM) :** « Les machines-langage et les machines-système »
- 15h45 - Michel Fingerhut (en cours de confirmation ; contact : I. Astic) :**
« L'introduction et la diffusion d'Unix en France / les guerres de religion »
- 16h15 - Michel Gien :** « Chorus, de la recherche à l'industrie »
- 16h45 - Pierre Mounier-Kuhn (CNRS et Université Paris-Sorbonne) :** « Comment les systèmes d'exploitation sont devenus un objet stratégique (Bull et CII, 1960-1975) »
- 17h20 – Questions**

17h30 – Clôture du colloque

L'histoire des Systèmes d'exploitation est à la fois un terrain en friche et déjà une problématique majeure d'une histoire de l'informatique qui a dépassé l'histoire des machines, d'une part, et qui cherche à penser l'articulation entre la conception des systèmes informatiques et les usages numériques, d'autre part. Le système d'exploitation est précisément l'objet qui organise les processus dans les ordinateurs, gère la mémoire, les échanges avec l'extérieur de la machine, les réseaux et, *in fine*, assure l'interface entre humain (utilisateur) et machine (ordinateur).

À travers le projet « Hist.Pat.info.Cnam » il est ressorti que le sujet des Systèmes est central dans le processus de montée en recherche en informatique au sein du Cnam, autour de l'Equipe Systèmes (1975-85). La première partie du colloque livrera un bilan du projet et des recherches sur la généalogie du laboratoire de recherche en informatique (CEDRIC), étudié à travers la trajectoire de ses acteurs, leurs productions et publications scientifiques (mémoires d'ingénieur, bibliographies).

La seconde partie du colloque vise à renseigner et élargir ces questions encore peu traitées en histoire de l'informatique, grâce à des apports conjoints de l'équipe de pilotage des séminaires « Histoire de l'informatique et du numérique » (I. Astic, P. Mounier-Kuhn, F. Anceau – équipe insérée dans le réseau « Vers un musée de l'informatique et de la société numérique »).

Point de rencontre et de convergence de ces deux programmes scientifiques, le colloque convoque donc trois perspectives : des recherches historiques, une perspective patrimoniale et archivistique, ces deux angles étant accompagnés par une réflexion sur la conception d'un système documentaire / bibliographique et sur ses fonctions en écho aux recherches historiques.

Il est organisé en 4 sessions :

Les sessions 1 et 2 ...

Les sessions 3 et 4 visent à rendre leur profondeur historique à ces problématiques. Nous avons invité deux chercheurs pour 2 keynotes centrales : etc.

Comité d'organisation / Comité scientifique

Isabelle Astic (Musée des arts et métiers)

Pierre-Henri Cubaud (CEDRIC, Cnam)

Claudine Fontanon (CAK, EHESS)

Raphaël Fournier (CEDRIC, Cnam)

Gérald Kembellec (DICEN, Cnam)

Pierre Mounier-Kuhn (Paris 1, CRM et CAK)

Cédric Neumann (HT2S, Cnam)

Camille Paloque-Berges (HT2S, Cnam)

Loïc Petitgirard (HT2S, Cnam)

François Anceau (Professeur émérite Cnam)

Annexe – Programme du Colloque international « Unix en Europe : entre innovation, diffusion et appropriation » - 19 octobre 2017

Colloque international Unix en Europe : entre innovation, diffusion et appropriation

Jeudi 19 octobre 2017

**Conservatoire national des arts et métiers
292 rue Saint Martin - 75003 Paris
Amphi C – Abbé Grégoire**

Colloque organisé au Cnam, conjointement par les équipes « **Histoire de l'informatique et de la société numérique** », Musée des arts et métiers et HT2S-« **Histoire / Patrimoine de l'informatique au Cnam** ».

Partenaires : Labex HASTEC et laboratoires CEDRIC et DICEN (Cnam), Centre Alexandre Koyré (EHESS).

Programme

9h – Accueil du public

9h15 - Introduction générale, présentation de la journée

Isabelle Astic, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

9h30 - 10h20 – Keynote « La conversion Unix »

- 9h30-10h00 **Laurent Bloch** : « Universitaires et ingénieurs avant et après Unix. Une controverse intellectuelle tacite »
- 10h00-10h20 **Benjamin Thierry** : discussion avec Laurent Bloch sur la question de la « conversion religieuse » à Unix.

10h20 - 11h00 : Table ronde : « Unix au Cnam : machines, recherches et enseignement »

- Avec des enseignants-chercheurs et ingénieurs du « laboratoire de calcul » du Cnam dans les années 1970-1980 : **Gérard Florin, Philippe Razac, Eric Gressier, Jean-Christophe Hanout, Frédéric Sourdillat, Daniel Lippman.**
- Animation : **Isabelle Astic**
-

11h00-11h15 : Pause

11h15-12h15 : Keynote « Unix dans l'histoire du logiciel »

- 11h15-11h45 **Thomas Haigh** : « Contextualizing UNIX: Cooperative Software Development Practices From the 1950s to the 1970s »
- 11h45-12h15 Discussion générale animée par **Loïc Petitgirard**

12h15 - 13h45 : Pause déjeuner (buffet – sur place)

14h-15h : Session « Communautés et groupes d'utilisateurs d'Unix »

Animation : Camille Paloque-Berges

- 14h-14h20 **Clem Cole (Intel/Usenix)** : « UNIX : A View from the Field as We Played the Game »
- 14h30-14h50 **Philippe Dax (Telecom Paristech/ex-ENST)** : « L'Abbaye de Thélème Tribunixienne »

15h-16h : Session « Unix, entre industrie et entreprise »

Animation : Pierre Mounier-Kuhn

- 15h-15h20 **Jacques Talbot (ex-Bull Grenoble)** : « UNIX vu de province 1982-1992 ».
- 15h30-15h50 **Jean-Yves Brucker (ex-IBM)** : « Unix à IBM : le système AIX »

16h-17h : Session « Après Unix : vers le logiciel libre et l'open source »

Animation : Raphaël Fournier

- 16h15-16h35 : **Ginevra Sanvitale (Technical University, Eindhoven)** : « The History of Free Software in the History of Computing »
- 16h45-17h05 : **Ollivier Robert** : « Les débuts des Unix libres en France ».

17h -17h30 : Discussion générale et clôture du colloque

Annexe – Sommaire des Cahiers d’histoire du Cnam n° 7-8

Dossier - La recherche sur les systèmes : des pivots dans l’histoire de l’informatique – I/II

L’émergence d’un laboratoire de recherches en informatique au Cnam (1968-1990) et le rôle de la recherche sur les Systèmes

Introduction au premier volume

Camille Paloque-Berges et Loïc Petitgirard – p. 9

Les chaires de mathématiques appliquées au Cnam à l’époque des Trente Glorieuses

Claudine Fontanon – p. 21

L’Équipe Systèmes (1975-1980) et la genèse de la recherche en informatique au Cnam

Camille Paloque-Berges et Loïc Petitgirard – p. 25

Le mini-ordinateur Systime 8750

Isabelle Astic – p. 57

Un professeur sans recherches : la trajectoire professionnelle de Paul Namian au Cnam

Cédric Neumann – p. 63

Entretien avec Gérard Florin - p. 81

Entretien avec Viviane Gal – p. 121

L’histoire du Cédric : penser un dispositif archivistique en histoire des sciences

Gérald Kembellec, Raphaël Fournier-S’niehotta et Pierre Cubaud – p. 133

La recherche sur les systèmes : des pivots dans l’histoire de l’informatique – II/II

Introduction au second volume

Éléments d’histoire des systèmes d’exploitation des années 1960 aux années 1990

Camille Paloque-Berges et Loïc Petitgirard – p. 9

Qu’est-ce qu’un système d’exploitation ? Une approche historique

Marteen Bullynck – p. 19

La Saga des machines langages et systèmes

François Anceau – p. 41

Émergence des systèmes d’exploitation comme discipline

Claude Kaiser – p. 53

The History of Unix in the History of Software

Thomas Haigh – p. 77

Unix : construire un environnement de développement de A à Z

Warren Toomey – p. 91

Unix: A View from the Field as We Played the Game

Clement T. Cole – p. 111

La conversion à Unix. Un exemple de prophétisme informatique ?

Laurent Bloch – p. 129

Unix vu de province : 1982-1992

Jacques Talbot – p. 145

Unix et les systèmes ouverts dans Bull, avant l'Internet

Michel Élie et Philippe Picard – p. 163

Annexe - Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam (1945-1975)

André Grelon, Claudine Fontanon, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

Liste des Notices (état Mars 2019)

NOM PROFESSEUR	DATE NOMIN ATION	CHAIRE
1. ALLISY André	1967	Métrologie
2. ANGEL Yves	1957	Transmissions radio-électriques.
3. AVEZ André	1970	Mathématiques appliquées
4. BELLIER Maurice	1972	Electrotechnique. Machines électriques (ex directeur du LNE).
5. BERLOT Roger	1969	Production et traitement des matières plastiques.
6. BERNARD Michel- Yves	1962	Radioélectricité générale
7. BEZIER Pierre	1968	Fabrications Mécaniques
8. BIZE (Dr) Paul René	1970	Orientation professionnelle et psychologie du travail
9. BLACHERE Gérard	1971	Techniques industrielles de l'architecture
10. BONNEFILLE Robert	1973	Electrotechnique
11. BONNEAU Pierre	1965	Mathématiques appliquées aux opérations financières
12. BONNEMAY Maurice	1958	Electrochimie
13. BUSSON André	1957	Electricité industrielle
14. CAUCHOIS Yvette	1949	Physique appliquée aux industries du vide et de l'électron
15. CAZIN Michel	1959	Mécanique industrielle
16. CHENON René	1966	Mathématiques appliquées aux métiers
17. CHATAIN Michel	1968	Production et transformation de matières plastiques
18. DAUMAS Maurice	1969	Histoire des techniques modernes et contemporaines
19. DIDIER André	1952	Techniques d'enregistrement et de reproduction du son
20. DOUBLET Jacques	1959	Droit du travail et de la sécurité sociale
21. DUBOIS Pierre	1954	Physico chimie du traitement des matières plastiques
22. DUCASSÉ Pierre	1957	Méthodes d'expressions de la pensée scientifique et technique
23. DUFLOT Jean	1967	Sidérurgie
24. ERTAUD André	1954	Technologie des réacteurs
25. ETIENNE André	1955	Chimie industrielle
26. FAURE Robert	1977	Recherche opérationnelle
27. FILLIAT Georges	1960	Géologie en vue des applications
28. FOURNIER André	1964	Physique générale

29. FOURASTIÉ Jean	1959	Assurances du point de vue économique
30. FROMONT de Martin	1957	Sécurité du travail
31. FRIBERG Jean	1967	Machines hydrauliques et thermiques
32. GARREAU Marcel	1955	Traction électrique
33. GERBIER Jean	1969	Organisation du travail et de l'entreprise
34. GERY Pierre	1964	Constructions civiles
35. GIRERD Jean	1965	Formulation des systèmes physiques pour machines
36. GIRERD Henry	1949	Technique aéronautique
37. GOGUELIN Pierre	1970	Orientation professionnelle et psychologie du travail
38. GRAVIER Jean-François	1965	Economie et organisation régionales
39. GRINBERG Boris	1958	Radioactivité appliquée
40. GUERIN Paul		directeur du Cnam pendant les Trente Glorieuses
41. GUETTE Jean-Paul	1974	Chimie organique
42. GUINIER André	1949	Rayons X et structure de la matière
43. GUILLEBEAU Charles	1965	Introduction aux problèmes socio-économiques de l'entreprise
44. JUGLAS Jean-Jacques	1962	Géographie économique
45. LAVOLLAY Jean	1948	Chimie agricole et biologique
46. LESNE Marcel	1973	Méthodes d'expression de la pensée scientifique
47. LOMBARD Jean	1961	Eléments de machine
48. LOURD Jacques	1973	Technologie textile et chimique
49. LUSSATO Bruno	1969	Organisation du travail et de l'entreprise
50. MARTELLY Julien	1958	Physique nucléaire
51. MASSON Jean	1975	Pratiques des techniques du crédit bancaire
52. MATHONNET Jean-Claude	1975	Initiation aux études juridiques
53. MENARD Maurice	1973	Aérodynamique en vue des applications
54. MORETTI Charles	1974	Résistance des matériaux appliqués aux fabrications mécaniques
55. MOUTON Claude	1967	Etude géographique et économique des marchés
56. MOUTON Claude	1975	Economie rurale
57. NAMIAN Paul	1962	Informatique appliquée à la gestion
58. PERCEROU Roger	1972	Droit Commercial
59. PEROCHON Claude	1973	Comptabilité
60. PRAULT Luce	1958	Economie rurale
61. PROUVÉ Jean	1959	Art appliqué aux métiers
62. PRUDHOMME Raymond	1959	Automatisme industriel
63. RAPIN Michel	1973	Contrôle non destructif
64. RAYMOND François Henri	1957	Informatique et programmation

65. RIGAL Roger	1958	Radioélectricité générale
66. ROUBINE Elie	COURS 1958	Radioélectricité générale
67. ROTH Etienne	1961	Chimie nucléaire
68. SALET Georges	1960	Résistance des matériaux appliqués à la construction mécanique
69. SALMON Jean	1963	Physique générale dans ses rapports avec l'industrie
70. SALOMON Jean-Jacques	1974	Technologie et Société
71. SCHERRER Jean	1958	Physiologie du travail
72. SCHLOGEL Maurice	1960	Organisation et fonctionnement des marchés
73. SEBAG Lucien	1970	Initiation aux études juridiques
74. SEGUIN Paul	1967	Méthodes physiques d'analyse
75. SEDILLE Marcel	1961	Machines
76. SEPTIER Albert	1973	Physique des solides appliquées à l'électronique
77. SOUBIS Jean-Pierre	1973	Combustion, mécaniques des fluides, moteurs alternatifs
78. TESSIER Marcel	1973	Traction électrique
79. THELLIEZ Sylvain	1962	Automatisme
80. TREMOLIERES Jean	1964	Biologie dans ses rapports à l'agriculture
81. VABRE Jean-Paul	1966	Cours : Electronique des impulsions
82. VASSEUR Michel	1971	Droit Commercial / droit des affaires
83. VEYSSIE Jean-Jacques	1967	Physique appliquée à la production du froid
84. WAHL Henri	1961	Chimie générale appliquée
85. WISNER Alain	1966	Ergonomie

Annexe – Notice biographique d’André Allisy – Chaire de Métrologie

À paraître dans le Volume 2 du *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* (1945-1975) – dirigé par Claudine Fontanon, André Grelon, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

ALLISY André (1924 – 22 février 2017) - Chaire de Métrologie (1967-1990)

André Allisy devient professeur titulaire de la Chaire de Métrologie le 1^{er} novembre 1967, il a 43 ans et une carrière déjà remarquable en métrologie. Son parcours ultérieur est d’autant plus important qu’il croise plusieurs évolutions majeures de la métrologie, au niveau national et à l’échelle du Cnam. La période qui s’étend de 1964 aux années 1990 est en effet celle d’une restructuration d’ampleur de la métrologie française, sur le plan scientifique, technique et industriel. La création de la chaire de métrologie au Cnam en 1967 s’inscrit d’ailleurs d’emblée dans cette perspective de long terme.

En arrière-plan de cette création se trouve à la fois l’histoire longue des relations du Cnam et de la métrologie (qui remonte à la fin du XVIII^{ème} siècle et au développement du système métrique), et les spécificités de ce domaine d’activité. La métrologie, science et technique des mesures, est à la croisée de plusieurs disciplines, au sein de la physique (mécanique, électricité, thermique, thermodynamique...) et des mathématiques¹. La chaire trouve un lieu d’accueil plutôt favorable dans un Cnam pluridisciplinaire. Et dans l’histoire du Cnam, cette création est en coïncidence avec une transformation profonde : le « départ » du LNE (Laboratoire national d’essais) entre 1970 et 1978, qui cristallise les écarts, parfois importants, entre les activités d’étalonnage et d’essais, et les activités de recherche en métrologie scientifique. Ces quelques éléments permettent de saisir la nature des défis relevés par A. Allisy dont nous retraçons maintenant le parcours².

Formation scientifique : vers la métrologie

André Allisy est né en 1924 à Brunstatt, en Alsace, qu’il quitte en 1940 lorsque la France, avec le régime de Vichy, passe sous occupation allemande. Il part pour Besançon, dans un premier temps, pour passer son baccalauréat en 1942 et suivre une première année à la Faculté des sciences. Il prend la direction de Paris ensuite, pour des raisons pratiques et familiales, et obtient une Licence ès Sciences physiques en 1945.

¹ La métrologie recouvre plusieurs types d’activité. La métrologie dite “d’atelier” vérifie et atteste de la conformité à des spécifications. La métrologie c’est aussi la métrologie légale qui vise à garantir l’honnêteté des transactions entre particuliers et professionnels, par la réglementation des mesures utilisées dans le commerce et l’industrie. Enfin, la métrologie scientifique, celle qui nous occupe plus centralement ici, a d’autres objectifs : avec des instruments de précision, elle élabore les systèmes de références, les étalons, améliore leur précision, pour diffuser des normes mises à jour constamment.

² Nous avons eu l’opportunité de recueillir un long entretien avec A. Allisy, dont une partie a été retranscrite dans (Petitgirard (ed.) 2015).

Immédiatement après sa formation, il travaille comme physicien, dans le giron d'Yves Rocard, alors « patron » de la physique à l'ENS à Paris³ et directeur d'un groupe de recherche pour la Marine. Au sein du Service des Études et Recherches de la Direction centrale des constructions et armes navales, Allisy travaille sur la détection et le traitement des signaux, puis s'occupe spécifiquement des questions de rayonnements ionisants (rayons X, rayons gamma...), plus particulièrement de la dosimétrie (mesure de l'exposition à ces rayonnements).

Cette trajectoire vers la dosimétrie est liée à un contrat entre le laboratoire de Rocard et la société Massiot⁴, une société française de radiologie, qui fabriquait des instruments de mesure (dosimètre) pour les rayons X, sous licence. Il est confié à Allisy la tâche d'analyser leur fonctionnement, d'en déterminer les évolutions possibles. Ce qui l'a conduit à concevoir ce qu'il manquait en France à ce sujet : un étalon de mesure de rayonnements, pour l'unité Roentgen. Son succès repose sur la littérature disponible à la bibliothèque de l'ENS, à savoir les publications du NBS⁵, en particulier de Lauriston Taylor (responsable de la radiométrie au NBS) ; et c'est la comparaison de l'étalon français avec celui du NBS qui construit la réputation d'A. Allisy dans le domaine, et progressivement à l'échelle internationale.

De l'ICRU au BIPM

Ce premier succès lui ouvre les portes de la commission ICRU⁶, une commission internationale de 12 personnes qui analysent les concepts et grandeurs physiques à mesurer, qui étudient les techniques et les unités de mesure. En 1953 (sur suggestion de Massiot) il est envoyé à la session de l'ICRU à Copenhague, ICRU qu'il ne quittera qu'en 1997, après avoir pris successivement des responsabilités : président de groupe de travail, vice-président puis président de l'ICRU (1985-1997).

Sous l'impulsion de Lauriston Taylor, l'ICRU a poussé le BIPM (Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres) pour que soit créé une section sur les rayonnements ionisants, aux côtés des grandeurs plus classiques comme les longueurs, les masses, etc. La décision est actée en 1957 au BIPM, nécessitant des travaux au niveau des bâtiments, dans le parc de Saint Cloud : la section lance ses travaux en 1960, et Allisy en prend la direction. En parallèle des travaux de la section (et même un peu avant) un comité consultatif des étalons de rayonnement ionisant est créé au BIPM, Allisy sera le représentant de l'ICRU dans ce comité.

En 1961 Allisy est nommé chercheur principal, physicien, chargé de la section des Rayonnements ionisants au BIPM, tout en ayant son activité au laboratoire de recherche de l'ENS, regroupant 7 personnes.

Création de la Chaire de Métrologie au Cnam

³ Pour plus de détails sur ce contexte et environnement scientifique déterminant, nous renvoyons à (Pestre 1994).

⁴ La société Massiot deviendra Massiot-Philips en 1960, en tant que filiale du groupe néerlandais Philips ; aujourd'hui devenue Philips Systèmes médicaux.

⁵ *National bureau of standards*, devenu NIST : *National Institute of Standards and Technology* en 1988. C'est l'agence de développement de la métrologie et des normes standards aux États-Unis.

⁶ International Commission on Radiation Units and Measurements.

Comment A. Allisy arrive-t-il au Cnam en 1967 ? C'est le fruit de plusieurs rencontres et décisions à l'échelle locale et nationale, qui a d'abord conduit à la création d'une chaire dédiée à la métrologie au Cnam. Au cœur de ce processus se trouve d'un côté le physicien Pierre Aigrain, clé de la politique scientifique et technique dans la période gaullienne, et de l'autre l'institution Cnam.

La création de la chaire résulte d'un choix de politique scientifique nationale. Du côté militaire comme du point de vue civil (DRME et DGRST⁷, alors pilotée par Aigrain), la métrologie scientifique française n'est plus au niveau international, elle est devenue invisible alors même que la France a porté le système métrique et accueille le BIPM à deux pas de Paris.

Le Cnam est au cœur du jeu pour de multiples raisons. Tout d'abord parce qu'il est en proie à une crise interne avec le LNE (tout au long des années 1960), qui est le laboratoire en charge d'une partie de la métrologie nationale. Egalement parce qu'il existe une très longue tradition de métrologie au Cnam (qui remonte quasiment à 1798), et que le Cnam peut porter un double effort d'enseignement et de recherche. En 1967, l'objectif est bien de restructurer tout le système métrologique français, et à l'échelle du Cnam de résoudre une partie de la crise, de renouveler et dynamiser la recherche scientifique en métrologie et de créer un enseignement de métrologie au goût du jour, à destination de « tous » les publics, dans le monde industriel et scientifique avant tout.

Pour toutes ces raisons, trois instruments de cette politique sont construits : une chaire de métrologie, suivi par la création d'un Institut national de métrologie (IMN) voulu en 1968 au sein du Cnam ; puis un Bureau national de métrologie (BNM) sera créé en 1969 pour coordonner tous les efforts en métrologie.

Le titulaire de la chaire de métrologie

De par la volonté politique qui l'a accompagné, la charge de cette chaire est lourde, c'est un véritable défi. Et si elle est ouverte au Cnam, des institutions comme le CEA pèseront aussi sur les choix et orientations. Or il se trouve que Pierre Aigrain et A. Allisy se connaissent bien, par l'entremise de Rocard⁸. La candidature d'Allisy représente aux yeux de beaucoup un bon compromis : une carrière scientifique remarquable, une expérience d'enseignement importante, et il pourrait garder, en partie, des activités au BIPM. Un seul bémol : Allisy n'était pas particulièrement volontaire pour la mission, même s'il l'a prise à bras le corps très rapidement.

Une fois la candidature actée, l'attribution de la chaire à Allisy se déroule très rapidement, la concurrence étant réduite à très peu : les deux autres candidats ont un dossier bien terne face à lui. Ce qui est d'ailleurs à l'image d'une métrologie plutôt occupée à l'étalonnage et la normalisation, plus qu'à la conduite de projets scientifiques de haut niveau en 1967. Allisy est titularisé le 1^{er} novembre 1967.

⁷ Direction des Recherches et Moyens d'Essais (dépendant du Ministère des armées) et Délégation Générale à la Recherche scientifique et technique (initialement rattachée au Premier ministre) (Duclert 2004).

⁸ Pour tous les détails, voir l'entretien avec Allisy dans (Petitgirard (ed.) 2015).

Enseigner la métrologie

Allisy a élaboré et assuré des enseignements tout au long de sa carrière, mais peu d'enseignement de métrologie à strictement parler, avant le Cnam : il a enseigné beaucoup l'électronique (à l'École Spéciale de Mécanique et d'Électricité notamment, pendant 20 ans), à l'INSTN (Institut national des sciences nucléaires) et dans le 3^{ème} cycle de l'Université d'Orsay.

Avant la chaire de métrologie, il existait par ailleurs un cours de métrologie au Cnam, organisé par Pierre Fleury⁹ depuis 1932. Il s'agissait d'un cours public traitant des unités métriques, des techniques de construction et de contrôle des appareils de mesure. Il avait pour vocation initiale de former des techniciens pour l'industrie en deux années. Le cours subsiste jusqu'en 1964 à raison de 20 leçons par an¹⁰.

Au fil des années 1960, la place croissante de la métrologie en France, pour des raisons économiques, industrielles, légales, génère des besoins de formation importants. Les besoins des services légaux ont pu être comblés, mais ceux de la métrologie « amont » (au sein des laboratoires nationaux, chargés de la recherche, de la mise en œuvre de la définition des unités, de leur matérialisation et de leur diffusion) et la métrologie « aval », celle qui diffuse aux acteurs du monde industriel et commercial, n'ont pas trouvé de réponse satisfaisante avant la création de la chaire de métrologie.

Prenant acte de tous ces éléments, Allisy s'attache à renouveler l'enseignement de métrologie, qui s'inscrit dans le cursus de formation à la physique au Cnam (il faut rappeler qu'au cours des Trente Glorieuses, les cours de Physique sont massivement demandés et suivis). Pour lui, l'enseignement de métrologie avait une double vocation : former des métrologues, et s'inscrire comme discipline complémentaire des formations techniques du Cnam.

Cet enseignement « moderne » de la métrologie met d'emblée l'accent sur les notions fondamentales suivantes : le SI (Système international d'unités), les étalons, les méthodes de mesure et l'expression du résultat de mesure et de son incertitude (Allisy 1971; Allisy 1972; Allisy 1973; Allisy 1980; Allisy 1983)¹¹.

Le SI constitue le langage commun et concentre les définitions des unités de mesure. Les étalons sont la représentation matérielle des unités utilisées comme référence pour les instruments de mesure. Le cours présentait les principes physiques mis en œuvre, la hiérarchisation des étalons et leurs raccordements successifs.

L'expression du résultat de mesure et de son incertitude correspondait alors à une partie importante et novatrice du cours de métrologie, la maîtrise de l'outil mathématique étant intégré au cours. Sur un cours composé globalement d'une quarantaine leçons d'une heure, environ la moitié était consacrée à cette thématique. La notion d'incertitude est fondamentale en métrologie puisqu'il s'agit de déterminer la limite de la connaissance apportée par le résultat de la

⁹ Voir la notice biographique : « Pierre Fleury (1894-1976). Professeur de métrologie ; Professeur de Physique générale dans ses rapports à l'industrie (1936-1964) » dans (Fontanon et Grelon (eds.) 1994).

¹⁰ Les effectifs de son cours atteignent une centaine d'auditeurs dans les années 1945-1955, mais s'effritent au début des années 1960. On ne recense plus que 22 auditeurs en 1960. Arch. Cnam : PV/CP (1945-1964), Statistiques de l'enseignement (cours de métrologie).

¹¹ La présentation détaillée des contenus et cycles est reprise de l'article (Lecollinet 2015).

mesure, en fonction des moyens matériels et humains mis en œuvre. Qualifier cette incertitude doit accompagner tout résultat de mesure, sans lequel il n'a pas de sens, et c'est une condition pour construire la confiance dans le résultat. La notion est ancienne¹², mais très à l'esprit d'Allisy, lui-même pris dans les discussions internationales sur ces questions, qui aboutiront à la rédaction du GUM (Guide pour l'expression des incertitudes de mesure) en 1992 au niveau du BIPM.

L'accent est également mis sur la nécessité d'associer l'aspect théorique (cours et applications au sein des séances d'exercices dirigés) et l'aspect expérimental par la création d'un laboratoire de Travaux Pratiques avec des manipulations aussi proches que possible des expériences menées dans les laboratoires de métrologie.

Créé initialement pendant l'année universitaire 1967-68 sous forme d'un cours unique associé à ses TP, il conserve cette forme l'année suivante. À partir de l'année scolaire 1969-70, le cursus est composé d'unités de valeur capitalisables, suite à la réforme des cycles (parcours en 3 cycles A, B et C).

Le Cycle A comme introduction à la métrologie

Le cycle A constituait une introduction aux fondements de la métrologie, pour un public large¹³, abordant plusieurs thématiques. Pour en donner une idée rapide et indicative :

- L'analyse d'un résultat de mesure, la correction des erreurs maîtrisées et les premières notions sur l'incertitude du résultat.
- Les principes de fonctionnement des capteurs.
- Le traitement du signal (analogique) de mesure : amplification, filtrage, rôle de l'amplificateur opérationnel.
- Les propriétés des instruments de mesure (régime statique linéarité, la droite des moindres carrés, régime dynamique : notion de rapidité, de bande passante).
- Premières notions sur l'instrumentation numérique : échantillonnage, quantification, fonctionnement d'un multimètre numérique.

À ces cours, étaient associés des travaux pratiques tels que :

- Instrumentation - amplification et filtrage de signal, simulateur analogique (notion de temps de réponse et de bande passante), construction et caractérisation d'un voltmètre numérique à rampe.
- Caractéristiques et étalonnage de capteurs.
- Étude d'une balance, caractéristiques, grandeurs d'influence, double pesée, correction de poussée de l'air.

¹² (Wise (ed.) 1995) donne un aperçu historique concernant l'émergence de la précision, son importance, en physique comme dans plusieurs domaines de l'industrie au 19^e siècle. Voir (Lecollinet 1991).

¹³ Le cycle A ouvert au niveau bac et amenant jusqu'à bac+2 permettait l'obtention du Diplôme du Premier Cycle Technique (DPCT) équivalant dans les esprits à un DUT/BTS sans que ce diplôme soit effectivement reconnu par les branches professionnelles.

- Le signal de mesure : aspect temporel (oscilloscope), aspect fréquentiel (analyse et synthèse d'un signal périodique).

Le cycle B comme approfondissement

Le cycle B vise à approfondir les notions clés pour un public d'auditeurs plus concernés par les questions métrologiques *a priori* - le cycle B correspondant au parcours de bac+2 à bac+4, permettant l'obtention du Diplôme d'Études Supérieures Techniques (DEST). Il articulait les grandes thématiques suivantes :

- Le SI (Système international), définitions des unités et leur matérialisation (étalons).
- Le processus de mesure, l'identification des composantes d'erreurs, et leurs conséquences.
- Composition des incertitudes et notion d'incertitude globale.
- La méthode des moindres carrés généralisée vue comme une technique à la fois d'estimation des paramètres d'une courbe d'étalonnage et de l'incertitude de ces paramètres.
- Les notions fondamentales sur les signaux analogiques et numériques (échantillonnage, quantification, fonctionnement d'un compteur d'un fréquencemètre, principes de fonctionnement des voltmètres numériques).

L'accent a été délibérément mis sur la notion d'incertitude et il faut souligner que la manière d'aborder ce point a évolué sensiblement et parallèlement à la réflexion menée par l'ensemble des laboratoires nationaux de métrologie. L'enseignement expérimental insiste sur les techniques utilisées dans les laboratoires de métrologie pour matérialiser les étalons, les comparer, la mise en œuvre des techniques expérimentales, visant à éviter certaines causes d'erreurs ou à les compenser.

Dans ce cycle B, on voit se dessiner déjà l'articulation entre les enseignements et l'INM, laboratoire national en charge de quatre grandeurs et unités du SI (mètre, kilogramme, kelvin, candela) ce qui se retrouve dans une partie des travaux pratiques.

Toujours dans ce cadre du Cycle B, deux dominantes étaient proposées aux élèves : « Instrumentation » et « Optique appliquées aux mesurages ». Dans la dominante « Instrumentation », trois points étaient approfondis :

- La notion de Chaîne de mesure (échantillonneur-bloqueur, convertisseur analogique-numérique, codage et transmission de l'information).
- L'analyseur spectral.
- La mesure de vitesse sans contact par intercorrélation.

Dans la dominante « Optique appliquée aux mesurages », il s'agissait de :

- Interférométrie ; applications : mesures de longueurs d'onde, mesure de déplacements.
- Mesure de l'indice de réfraction de l'air.

Le Cycle C, entre enseignement et recherche

Le cycle C était destiné aux auditeurs envisageant une spécialisation en métrologie. Il complétait la formation d'ingénieur au moyen d'un ensemble cours/TP spécialisé, un examen probatoire et la soutenance du mémoire d'ingénieur.

Au point de vue théorique, deux thématiques étaient enseignées en alternance, une année sur deux : l'une consacrée aux mesures optiques, considérée comme très spécialisée. L'autre, intitulée « signal et bruit », était plus généraliste et consacrée aux propriétés essentielles du signal et aux techniques d'amélioration du rapport signal sur bruit (filtrage, détection synchrone). Dans la distribution des charges d'enseignements, la responsabilité a incombé à Patrick Bouchareine, enseignant-chercheur à l'INM dans le domaine de l'interférométrie.

Concernant l'enseignement expérimental, les auditeurs sont seuls ou en binômes, et projetés dans une situation « réaliste », similaire à leur futur environnement professionnel. Plus encore que dans le cycle B, l'articulation avec l'INM est déterminante. Les travaux expérimentaux peuvent être considérés comme une initiation à la recherche, amenant les élèves à faire une étude bibliographique, à choisir la solution pertinente parmi plusieurs possibilités et à prendre des contacts soit avec les industriels, soit avec les laboratoires pour trouver les renseignements complémentaires nécessaires. L'encadrement est assuré par des chercheurs de l'INM.

L'évolution des enseignements de métrologie

Le cycle A a perduré dans sa structure, mais le cycle B a évolué du fait de la création, dans les années 1980-1990, de la Chaire d'instrumentation (Professeur Claude Morillon, puis Professeur Yves Surrel) : le choix s'est porté sur un développement important de l'acquisition et traitement du signal sous forme numérique. La création de la Chaire d'optique (Professeur Jean-Claude Canit) a également participé à ces réorientations. Cela est à l'image d'un enseignement transversal, nourrit de plusieurs disciplines. C'est également à l'image de ce qui peut se passer dans le Cnam qui reçoit des spécialités diverses et propose des formations facilement hybrides.

L'évolution se traduit également dans les titres des diplômes : « Physique-Instrumentation » et « Instrumentation-Mesure », faisant disparaître le terme « Métrologie ». Mais elle est bien présente dans les cursus. Il s'agit aussi de répondre aux demandes et besoins des auditeurs, attentifs au caractère porteur de ces nouvelles dénominations (à l'inverse du terme « Métrologie »).

Des enseignements à vocation nationale

La chaire de métrologie et l'IMN concentrent une expertise donnant lieu à des formations de nature variée. Tout d'abord, dans le cadre des missions assurées par le Cnam sur le territoire national, la chaire a fourni le soutien aux enseignements déployés dans les Centres Régionaux Associés (rebaptisés CCR – Centre du Cnam en région par la suite). Comme dans d'autres chaires, l'enseignement se déploie nationalement, par la diffusion des documents de cours, par de l'aide aux TP de manière générale, et grâce au soutien logistique local des IUT de Mesure-physique impliqués en local. Hors du Cnam, les enseignants participent régulièrement à de nombreuses formations spécialisées en métrologie dans des établissements variés : ESM-Ecole des Mines de Douai, LTP Jules Richard (spécialisation métrologie), Licence professionnelle à Jussieu, école d'été du BIPM pour n'en citer que quelques exemples.

Construire la recherche en métrologie au Cnam

Si au fil du temps la proximité et l'articulation entre les activités de la chaire et le centre de recherches métrologiques, qu'est l'INM, sont devenues assez naturelles, il ne faut pas oublier les difficultés dans l'élaboration de ce dispositif. Le double projet est, dès 1967, porté par Allisy, par l'institution, et soutenu au plan national. Néanmoins, le contexte au Cnam est celui d'une crise récurrente du LNE, lequel avait les attributions d'étalonnage et de recherche en métrologie (ce qu'il faisait très peu). Le projet de recherche correspond à la mise sur pied de l'INM : c'est sur la base du petit groupe de chercheurs du LNE, venus rejoindre le projet, que se (re)construit la métrologie scientifique au Cnam. Le directeur-adjoint de l'INM sera d'ailleurs André Moser, un des membres les plus actifs au LNE.

On comprend facilement les tensions que génère un tel changement dans l'institution : déposséder le LNE d'une partie de ses chercheurs n'est pas neutre. Mais ce n'est qu'une étape dans l'histoire longue et complexe du LNE et du Cnam, laquelle se soldera en 1978 par le départ définitif du LNE du giron du Cnam, pour devenir un EPIC (Etablissement public à caractère industriel et commercial).

Construire et développer l'INM a été le cheval de bataille d'Allisy. Ce qui n'est qu'une intention en 1968, devient un projet et un laboratoire de métrologie scientifique, chargé des références métrologiques primaires pour quatre unités fondamentales : longueur (mètre), masse (kg), intensité lumineuse (candela) et température thermodynamique (kelvin). Il faut souligner un point, significatif et caractéristique de la carrière d'Allisy : son domaine de prédilection scientifique est celui des rayonnements ionisants, mais ce n'est pas une activité développée au Cnam, dans les recherches conduites au sein de l'INM. Autrement dit, Allisy est, au Cnam et à l'INM, un catalyseur plus qu'un chercheur, qui tire sa légitimité de ses activités de recherche remarquables hors du Cnam.

Plus que les détails techniques de chaque domaine, il est utile de montrer comment Allisy à assembler les compétences pour élaborer l'INM. Il y a les premiers collaborateurs venus du LNE : André Moser et Georges Bonnier organiseront la partie thermométrie de l'INM ; Paul Riéty les rejoindra pour développer, dans la suite de ses travaux au LNE, les recherches en acoustique, sur les pressions, puis les références « masse ». L'INM embarque quasiment tous ceux qui étaient disposés à faire de la métrologie scientifique au LNE. Mais pour le domaine des longueurs et la photométrie, l'INM démarre avec l'existant du LNE, réduit à portion congrue par les circonstances¹⁴, et c'est le réseau d'Allisy qui entre en jeu.

L'équipe « Photométrie » se met en place autour de Jean Bastie, qui est recruté en 1970 : il est lui-même dans le réseau de la recherche en optique, connu du directeur du BIPM, Jean Terrien,

¹⁴ Voir (Bastie et Petitgirard 2015). Lorsque l'INM est instauré, le service de photométrie était en sommeil. En effet, Maurice Debure, le chef du service décède prématurément, quelques mois auparavant, et les activités de routine, les essais et étalonnages étaient assurées par une technicienne, Evelyne Pichard, unique personne du service. L'INM, en tant que laboratoire primaire dans la chaîne métrologique du BNM a hérité essentiellement des trois jeux de lampes qui conservaient la candela réalisée à partir du corps noir au point de congélation du platine. Le LNE conservait les lampes étalons de travail pour effectuer les étalonnages pour l'industrie ainsi que les différents équipements permettant ces étalonnages. En particulier il conservait le banc et les sphères photométriques ainsi que les alimentations pour les lampes et les appareils de mesure électrique associés.

proche d'Allisy. L'équipe agrège Evelyne Pichard du LNE, et Gabrielle Ferré du service température du LNE où elle effectuait principalement des étalonnages de thermomètres. Les activités du laboratoire de photométrie sont temporairement élargies pour inclure la pyrométrie optique : c'est-à-dire la mesure des températures élevées, supérieures à 800°C, par méthodes optiques. Cette activité spécifique avait pour but la réalisation d'un pyromètre photoélectrique. Après la réalisation du pyromètre, par Georges Négro dans le cadre de la préparation de son mémoire d'ingénieur Cnam, l'activité de pyrométrie a été rattachée à l'équipe « Température » de l'INM. Cet exemple suffit à montrer l'effervescence, les connections entre INM et la chaire, et la pluridisciplinarité qui règne dès les débuts de l'INM, condition *sine qua none* de son développement et de ses réussites.

Du côté de l'interférométrie (et les références « longueur ») l'histoire est elle aussi couronnée de succès. Allisy choisit de recruter Patrick Bouchareine, venant du Laboratoire Aimé Cotton¹⁵ : la connexion à ce laboratoire du CNRS centré sur l'interférométrie (et l'Université d'Orsay, où Allisy a fait des enseignements de 3^{ème} cycle) devient une sorte de partenariat qui s'établit sur le long terme puisque plusieurs membres de l'INM en seront originaires (par exemple Claude Morillon, titulaire de la Chaire « Instrumentation scientifique » à partir de 1982). Les synergies scientifiques se font à plusieurs échelles : au sein du Cnam (dans les années 1980-1990) et à l'échelle nationale, participant au développement et au rayonnement d'un institut désormais consolidé. L'INM trouve son entière place dans le système métrologique français et assure ses missions de mise en œuvre des références métrologiques.

Fin de carrière

André Allisy prend sa retraite du Cnam en 1990 : il restera dans les comités internationaux de dosimétrie, comme expert, jusqu'en 1997. En étant à la fois physicien au BIPM, professeur du Cnam, responsable des enseignements et directeur de l'INM, il a pu coordonner l'ensemble, lui donner une cohérence en cherchant à répondre aux besoins du moment¹⁶. Particulièrement actif à l'échelle internationale, Allisy a porté une notion essentielle en métrologie, celle d'incertitude de mesure, dans toutes ses actions. Par son intermédiaire, le Cnam a eu une position centrale dans la diffusion de la métrologie « moderne », suivant les évolutions de la recommandation INC-1 (1980) puis l'apparition du GUM (Guide pour l'expression des incertitudes de mesure) à partir de 1992¹⁷.

Le projet initial de 1967, comme ses évolutions, sont à l'image de la perception de la métrologie selon André Allisy, lequel a toujours pensé que la métrologie est comme un vaste réseau qui innerve les activités de la vie courante, du commerce, de l'industrie et de la science.

¹⁵ Laboratoire propre du CNRS, créé en 1927. C'est un laboratoire inauguré à l'occasion de la construction du Grand Électro-aimant du physicien Aimé Cotton. Le laboratoire est spécialisé depuis sa création en physique du magnétisme et basses températures, il est devenu une « École » dans ce domaine, et de nombreux physiciens de renom y ont été formés.

¹⁶ Pour tous les détails, sur les projets et parcours d'Allisy, voir l'entretien (Petitgirard (ed.) 2015).

¹⁷ La première recommandation sur l'expression de l'incertitude de mesure (INC-1) est le fruit d'un Groupe de Travail réuni au BIPM en 1980 pour analyser une enquête effectuée auprès des laboratoires nationaux de métrologie sur cette thématique.

De par la nature hybride et réticulaire de la métrologie, il a été à la fois nécessaire et possible de fédérer des enseignements connexes (instrumentation, capteurs) indispensables au processus de mesure et d'offrir des formations pour que les élèves puissent s'approprier les notions fondamentales, puis les restituer et les développer dans leur contexte professionnel.

À travers toutes ses fonctions, et avec sa passion, André Allisy a été un passeur, un médiateur, un catalyseur qui a permis de diffuser une certaine culture de la métrologie en France, en écho aux transformations au plan international.

Bibliographie

ALLISY André, 1983, *Les Incertitudes de mesures*, Paris, C.N.A.M.

ALLISY André, 1980, *Les Erreurs aléatoires*, Paris, Conservatoire national des arts et métiers, 44 p.

ALLISY André, 1973, *Notes de métrologie C-1973: traitement de données expérimentales*, Paris, Conservatoire national des Arts et Métiers.

ALLISY André, 1972, *Cours de métrologie*., Paris, Conservatoire national des Arts et Métiers, 71 p.

ALLISY André, 1971, *L'Enseignement de la métrologie au Conservatoire national des Arts et Métiers*, vol.3.

BASTIE Jean et PETITGIRARD Loïc, 2015, « L'aventure de la photométrie au Cnam (1970-2005) », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2015 p. 75-108.

DUCLERT Vincent, 2004, « La naissance de la délégation générale à la recherche scientifique et technique », *Revue française d'administration publique*, 2004, vol. no112, n° 4, p. 647-658.

FONTANON Claudine et GRELON André (eds.), 1994, *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers: dictionnaire biographique, 1794-1955*, Paris, France, Institut national de recherche pédagogique : Conservatoire national des arts et métiers, 1994.

GARNIER Bernard et HOCQUET Jean-Claude, 1990, *Genèse et diffusion du système métrique*, Caen.

LECOLLINET Michel, 2015, « Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam depuis 1967 », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2015 p. 109-128.

LECOLLINET Michel, 1991, *Traitement des données expérimentales: incertitudes de mesure, tests statistiques, ajustement des données*, Paris, CNAM, 169 p.

PESTRE Dominique, 1994, « La création d'un nouvel univers physicien, Yves Rocard et le laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure, 1938-1960 » dans *Le Livre du Bicentenaire de l'École Normale Supérieure*, sous la direction de J.F. Sirinelli, Paris, PUF, p. 405-422.

PETITGIRARD Loïc (ed.), 2015, « Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses », 2015, vol. 3, n° 1, (coll. « Cahiers d'histoire du Cnam »).

WISE Matthew Norton (ed.), 1995, *The values of precision*, Princeton (N.J.), Etats-Unis, Princeton university press, 372 p.

Sources

- Archives du Cnam : PV des Conseils d'administration et Conseil de Perfection (1945-1990)
- Entretien avec André Allisy, le 12 décembre 2012 (par Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard).

Annexe – Notice biographique de Maurice Bellier - Chaire d'électricité industrielle (1957-1973) et Directeur du Laboratoire national d'essai

À paraître dans le Volume 2 du *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* (1945-1975) – dirigé par Claudine Fontanon, André Grelon, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

Maurice BELLIER (1er décembre 1901 – date décès inconnue) - Chaire d'Electricité industrielle (1957-1973) / Directeur du Laboratoire national d'essai (LNE du Cnam) – (1949-1969)

Maurice Bellier devient Professeur titulaire de la Chaire d'Electricité industrielle en 1957, mais il est déjà à un poste à grande responsabilité dans l'établissement : il a été nommé directeur du Laboratoire national d'essais (LNE), une composante du Cnam, en 1949. Les deux fonctions sont complémentaires et répondent à deux enjeux majeurs de la période. D'une part la massification de la formation dans le domaine de l'électricité pour les industries françaises, lié au contexte de l'expansion économique et industrielle des Trente Glorieuses, et d'autre part à l'importance croissante jouée par la métrologie à tous les niveaux scientifiques, techniques, industriels, dans les efforts de normalisation et dans leur versant de « métrologie légale ». Pour comprendre le contexte au Cnam, il faut souligner que le LNE représente à lui seul près de 2/3 du personnel total du Cnam dans les années 1960. Et ajouter que le LNE, au terme d'un long processus, va s'autonomiser et sortir du Cnam dans les années 1970 – après la retraite de Bellier. Cela provoquera de fait une réorganisation et une redéfinition de la place du LNE et du Cnam dans le système technique français. Maurice Bellier se trouve donc au cœur des transformations de l'époque. Son parcours au Cnam illustre ces transformations en cours et leurs difficultés, jusqu'aux moments de crises, liées à l'ampleur des mutations, touchant l'établissement dans son ensemble.

Carrière avant le Cnam

Maurice Bellier est né à La Seyne (Var) le 1^{er} décembre 1901. Il entre à l'Ecole normale supérieure (promotion 1920) en inscrivant son parcours dans les Sciences physiques, et obtient l'agrégation de Sciences Physiques. Avant son arrivée au Cnam en 1949, il a une expérience forte dans l'enseignement technique d'une part, et dans les questions relatives aux essais techniques, allant jusqu'à la mise en place d'installations idoines d'autre part¹.

Son premier poste est celui d'assistant de Physique industrielle à la Faculté des Sciences de Marseille (1925-1928). Il conduit dans ce cadre l'installation du Service d'étalonnage électrique (étalonnages et mesures pour le compte de l'Institut technique de la Chambre de commerce) et collabore sur des projets de recherches (en spectroscopie atomique).

Bellier passe ensuite progressivement au service de l'Enseignement technique : nous sommes dans une phase de restructuration de ces enseignements, à l'échelle nationale, dont la toile de fond est constituée par la séquence de la crise de 1929, du gouvernement du Front Populaire en 1936, puis du gouvernement de Vichy (Pelpel et Troger 1993; Brucy 2005). Les initiatives vont se succéder de manière à ce que l'état prenne la main sur des formations très hétérogènes sur le territoire national. Les valeurs des formations sont fluctuantes d'un contexte local à l'autre, difficilement comparables entre elles, ce qui altère leur visibilité pour une industrie en train de se développer. L'état, par les services de l'Enseignement technique, vise une relative uniformisation des formations et des diplômes.

¹ Arch. Cnam, Dossier Bellier, Notice sur les travaux scientifiques.

Bellier va s'engager dans les travaux permettant d'assurer une liaison plus forte entre les cours et les travaux d'atelier, grâce à l'installation de laboratoires et salles d'essais – ce qui est permis par des crédits venant de l'Enseignement technique. Il assure cette fonction comme Professeur d'électricité générale et d'électricité industrielle à l'Ecole nationale des arts et métiers d'Aix (1928-1942). Dans cette école tout particulièrement il met en place une série d'équipements adéquats : un laboratoire d'enseignement d'Electricité générale, une Salle d'essais de machines électriques, un laboratoire d'essais de matériaux (enseignement et essais pour des industriels, notamment l'usine d'aviation de Marignane), un laboratoire d'essais hydrauliques (turbines) pour les travaux pratiques, une petite centrale thermique d'étude. Il enseigne également aux élèves-ingénieurs de l'Ecole d'Electricité industrielle de Marseille. Dans le même temps il continue ses collaborations avec la Faculté de Marseille, à l'image du suivi scientifique des travaux sur les couches métalliques minces avec le Professeur Rouard (Rouard 1937).

En 1942, il change d'échelle, et devient Inspecteur général de l'Enseignement technique (1942-1944). Difficile de circonscrire cette prise de fonction, sous le gouvernement de Vichy. Toujours est-il qu'il est chargé de l'inspection de la Mécanique appliquée et de l'Electricité industrielle dans toutes les Écoles d'Arts et Métiers et les Écoles nationales professionnelles. En 1944, à sa demande, il est mis en congé de ce service, pour partir exercer dans le secteur privé. Il devient Ingénieur en Chef à la Société Anonyme des lampes Neutron, qu'il quittera pour venir au Cnam. Chez Neutron, il s'occupe de la fabrication de tubes électroniques conventionnels et du prototypage de tubes à ondes progressives.

En 1946, avec Arthur Varoquaux (directeur de l'Ecole nationale professionnelle de Nancy), et Louis Pastouriaux (enseignant) il publie son premier manuel sur le sujet qu'il maîtrise le plus, l'Electricité industrielle (Pastouriaux, Varoquaux, et Bellier 1946).

Premier poste au Cnam : directeur du LNE

Bellier entre au Cnam, non pas en tant que Professeur mais comme directeur du Laboratoire national d'essai : il est nommé le 23 mars 1949 à ce poste, suite à la démission de son prédécesseur George-Albert Boutry (1904-1983). Il resta en poste jusqu'au 1^{er} décembre 1969. Dès 1949 Bellier est, d'une certaine manière, confronté aux difficultés récurrentes du LNE, qui perdureront sous sa direction. Au cœur de la problématique se trouve la définition même des missions du LNE, sujet sur lequel des conceptions différentes s'opposent. De 1936 à 1949, sous la direction de Boutry, la ligne directrice privilégiait la métrologie primaire du fait que la mission de conservation des étalons devenait effective et importante pour le Cnam et le LNE². Cela sans perdre de vue la mission de service à l'industrie qui doit aussi être celle du laboratoire. Mais cette ligne était loin de faire l'unanimité au Cnam. Le cumul de tensions et les complications liées à la construction laborieuse et couteuse du nouveau bâtiment pour le LNE (rue Gaston Boissier, Paris 15^{eme}) conduit à la démission de Boutry.

L'autre ligne défendue pour le LNE trouve ses mots dans l'opposition à Boutry et à la candidature même de Bellier : elle est portée par Albert Métral, professeur titulaire de la chaire de mécanique. Au-delà des questions de personnes, Métral (et Louis Longchambon³ qui est le candidat en lice face à Bellier pour la direction) considère que le LNE doit être fondamentalement un service aux laboratoires et aux industries. Malgré ces péripéties, le processus de nomination s'achève avec la nomination de Maurice Bellier qui va sensiblement

² Décret du 2 avril 1919 confiant au Conservatoire la mission de conservation des étalons du système métrique en France. Décret du 28 décembre 1931, rappelant celui de 1919, et créant le Dépôt des Etalons au Cnam.

³ Louis Longchambon (1892-1970) est professeur à Nancy, directeur du Laboratoire d'essai des produits réfractaires et de l'Institut du feu. C'est le frère d'Henri Longchambon (1896-1969) qui a été notamment directeur du CNRSA en 1938-39, résistant, homme politique et en responsabilité dans les politiques scientifiques et techniques après la guerre.

reprendre la ligne de Boutry. Il prend alors la direction d'un laboratoire dont le siège est dans le 15^{ème} arrondissement, très excentré géographiquement du Cnam, néanmoins dépendant de l'établissement de la rue Saint-Martin.

Le LNE jusqu'en 1964

Durant 15 ans, Bellier gère un laboratoire en croissance continue, pleinement reconnu, au personnel compétent, mais dont les moyens ne suivent pas la forte croissance. Ce sont autant de ferments des problèmes à venir : en interne, car les tensions avec la tutelle du Cnam sont nombreuses et régulières, et en externe, car si le laboratoire croît régulièrement, les demandes parvenant au Laboratoire s'accroissent en fait plus rapidement que les capacités du laboratoire.

La croissance des Trente Glorieuses appelle en effet une multiplication des essais techniques, accompagnée d'une multiplication des domaines concernés : radioactivité, matières plastiques, spectrophotométrie, acoustique, thermique, métallurgie, machines, matériaux, chimie... C'est le résultat de la sédimentation de missions multiples, de l'accumulation de demandes qui n'ont pas d'autres destinations qu'un laboratoire d'essai. Le LNE peut collaborer ponctuellement avec des chaires du Cnam mais force est de constater que le spectre d'intervention est très large, trop large pour un seul laboratoire, malgré les plus de 200 personnes qui y travaillent.

Les essais eux-mêmes sont devenus en partie des véritables études, celles qu'on demande à un bureau d'étude en recherche et développement. Le laboratoire fait fonction de laboratoire de recherche technique, intersectoriel. Le manque de clarification sur ses missions prioritaires laisse la porte ouverte à ces diverses demandes. Dans ce contexte technique, industriel et économique en pleine croissance, Bellier est assez contraint et le LNE sollicite des prestations extérieures pour compenser ses carences : cela pèsera lourd dans le budget global⁴.

Face à cet afflux, la métrologie scientifique pâtit d'une orientation toujours plus prononcée pour les activités courantes (et chronophages) d'essais et services. Or le LNE est identifié comme le correspondant national du BIPM, devant assurer également la conservation des étalons nationaux. Bellier dirige le laboratoire en composant avec ces multiples impératifs, le LNE n'a plus les moyens, ni le temps pour assurer ces fonctions : le BIPM, les instances internationales, le constatent et ne peuvent que le déplorer.

En fait, Bellier est confronté à l'injonction de réaliser des tâches qui dépassent les capacités d'un laboratoire dont les moyens sont déterminés et conditionnés par l'établissement Cnam, lequel a d'autres perspectives et orientations que celles d'un tel laboratoire. Les discussions autour du LNE sont récurrentes au Conseil d'administration du Cnam, qu'elles concernent les aspects financiers ou les missions du Laboratoire. C'est même une crise financière qui démarre en 1960. Sur la période 1950-1961, les recettes ont augmentées régulièrement avec l'activité du LNE : elles ont été multipliées par 3,7. Mais les rémunérations des personnels n'ont pas augmenté dans le même ratio, 1,7 seulement, ce qui est source de protestations et de tensions internes. Surtout, 1961 est l'année du premier déficit clair du LNE, même s'il est compensé par un excédent de l'année 1960. Le déficit se creuse par la suite, culminant à 585 000 francs en 1964 : malgré le contexte économique, malgré la croissance de son activité, le LNE est

⁴ La question du contrôle des thermomètres médicaux est un point à la fois anecdotique et en fait très pesant financièrement au LNE. Les contrôles ont été rendus obligatoires en 1918, et le LNE doit s'en charger, même si les contrôles ne sont pas rentables ! Ces contrôles mobilisent des ressources croissantes du fait de la demande à l'exportation qui décuple la production de ces instruments. Pour donner une idée de l'ampleur de la tâche, en 1964, près de 13 000 thermomètres sont testés chaque jour, soit 3 millions par an. Les moyens nécessaires sont disproportionnés pour un laboratoire comme le LNE.

déficitaire, et il est le seul laboratoire du Cnam dans cette situation (ce qui oblige même à puiser dans le fond de réserve)⁵.

Bellier est face à une situation paradoxale. Pour ce qui est réalisé au LNE, les coûts sont trop élevés : trop de coûts externes, opérations non rentables, masse salariale importante. Mais la demande d'essai au LNE, émanant d'industriels ou d'autres laboratoires est tellement importante que le LNE ne peut pas suivre : il lui faudrait plus de personnels. Bellier avance le chiffre de 350 salariés nécessaires pour suivre la cadence, contre les 200-230 dont il dispose en 1964. Il faut ajouter à cela qu'il est difficile d'embaucher du personnel qualifié, car les salaires proposés sont trop faibles par rapport à ce qui est pratiqué ailleurs, dans l'industrie.

Le LNE est structurellement non adapté au contexte économique, scientifique et industriel des années 1960, même s'il jouit d'une très bonne réputation dans ses travaux, et pour son impartialité. Sa légitimité, son existence ne sont jamais contestées, au contraire, et différentes solutions et adaptations ont été imaginées avant 1964.

La principale solution en discussion, qui est une revendication de longue date et réitérée par Bellier au CA du Cnam, est le changement de statut du LNE : lui donner de l'autonomie, en faire un EPIC (Etablissement public à caractère industriel et commercial), c'est la seule issue perçue par beaucoup d'acteurs. Mais ce changement est refusé. L'échec de ces propositions successives, ou leur non application, conduit à une mise à plat du dossier en 1964.

Professeur titulaire de Chaire au Cnam

En plus de sa fonction au LNE Maurice Bellier va devenir professeur du Cnam en 1957 : il est titularisé le 1^{er} novembre sur la chaire d'« Électricité industrielle (Machines) ». Mais ce cumul de deux fonctions au Cnam s'est avéré problématique dans le processus même de sa nomination⁶. Et il faut souligner qu'à la vacance de la chaire en 1956 (sur demande d'Edouard Lefrand qui souhaite quitter cette fonction après 20 ans de service) Bellier n'est pas candidat. La vacance est rouverte en espérant recueillir plus de candidatures, et à ce second appel Bellier fait acte de candidature.

Dans les comités qui sélectionnent les candidats, seuls deux personnalités vont se dégager clairement : Maurice Bellier et André Busson. Dans le cours du processus, ce sont finalement deux chaires qui vont être demandées et ouvertes en Électricité industrielle, pour ces deux postulants. Les arguments pour et contre ce dédoublement et au sujet de l'opportunité des deux candidatures sont nombreux. D'une part la forte demande pour les formations dans le domaine (il y a entre 1000 et 2000 élèves par cours en 1956) incite à créer deux postes, mais cela est perçu comme une mise en concurrence possible de deux cours des futurs titulaires, avec un risque de déséquilibre. C'est la raison pour laquelle la chaire sera divisée thématiquement en cours sur les « Machines » (attribuée à Bellier) et les « Installations, distributions, mesures » (attribuée à Busson). D'autre part, la position de Bellier au LNE pose un dilemme : rester au LNE serait au détriment de la disponibilité de Bellier pour les cours, en dans le même temps, cela offre une articulation remarquable entre le laboratoire national et les cours pour des professionnels du domaine. Les qualités d'enseignant de Bellier surajoutent à la problématique : le directeur du Cnam, Louis Ragey, rappelle qu'il est connu de tous comme un professeur « éblouissant et aimé de ses élèves ». En définitive, et malgré l'ampleur du travail attendu,

⁵ Un paramètre doit être pris en compte dans cette perspective strictement financière : le LNE a engagé un budget très important pour la construction du laboratoire rue Gaston Boissier, avec des équipements très performants, une infrastructure complètement adéquate à ses missions. L'investissement se ressent encore plusieurs années après la fin de la construction et l'installation dans ces locaux.

⁶ [Archives du Cnam, PV du Conseil de Perfectionnement et Conseil d'administration – 1956-1957]

Bellier est retenu et accepte la double charge avec la négociation, évidemment, de décharges possibles : Paul Seguin, le directeur adjoint au LNE, est nommé suppléant à la direction du LNE, et du côté des cours et travaux pratiques, Lefrand assure une transition de l'équipe en charge. Tout cela ajoute au contexte de l'évolution du LNE sur les années 1957-1967, de la crise qu'il va traverser, et de son pilotage rendu encore plus complexe par le fait que Bellier a aussi la tête du côté des amphithéâtres de la rue Saint Martin.

Une nouvelle crise du LNE

La crise secouant le LNE va se cristalliser avec la mise en place d'un groupe de travail sur l'année 1964, qui démarre l'analyse approfondie du LNE visant à proposer des mesures pour que le LNE « rende le service demandé »⁷ et qui va progressivement embrasser la question de toute la métrologie nationale. Maurice Bellier en tant que directeur du LNE est le premier concerné et il devient un acteur de cette recomposition nationale, voulue ambitieuse. Il est associé aux principaux acteurs de la métrologie, qui se réunissent 5 fois durant 1964 : Pierre Fleury (professeur au Cnam, qui fait le seul cours de métrologie) Louis Ragey (Directeur du Cnam), Pierre Salmon (Ingénieur Général), Léon Denivelle (Professeur au Cnam), Jean Debieesse (Directeur du Centre Études Nucléaire de Saclay- CEA), Jean Terrien (Directeur du BIPM), Paul Guérin (Directeur adjoint du Cnam).

Le rapport du groupe de 1964, concernant le LNE, préconise une modification structurelle profonde qui se résume dans la dénomination suggérée par les rapporteurs : le LNE pourrait prendre le titre d'« Institut national de métrologie, mesures et essais ». Pour assurer le financement du LNE, il préconise de redéfinir les modes d'organisation. À l'image des laboratoires équivalents à l'étranger, le budget du Laboratoire serait constitué des subventions de l'Etat, reçues par le canal du Cnam ; de subventions du CEA concernant les activités de Métrologie nucléaire ; et des produits des essais et contrôles réalisés, qui irait de pair avec un abandon des activités non rentables. Le budget serait réparti en quatre budgets propres aux quatre laboratoires du projet : Laboratoire de Métrologie générale, Laboratoire de Métrologie nucléaire, Laboratoire d'essais et mesures, Laboratoire des contrôles légaux et estampillages.

Le pilotage de l'ensemble doit être renforcé, c'est le sentiment général. Aux côtés du directeur de cet Institut s'organiserait un comité directeur restreint (avec la direction du Cnam et des scientifiques éminents). Les activités seraient suivies par des conseillers scientifiques, à rémunérer pour cette tâche, pris dans le corps des professeurs du Cnam, de l'Université, ou du monde industriel. En bref, dans les mots et dans les esprits c'est une rupture dans le mode de fonctionnement et les missions du LNE qui est souhaitée⁸, accompagnée par une restructuration globale de la métrologie nationale.

Le LNE, au sein du Cnam, est alors perçu en 1964 comme pouvant devenir le pivot du système national. C'est un écho à la situation de 1901, lors de la création du Laboratoire, moment où il aurait pu s'installer de manière hégémonique sur la métrologie et les essais, car il n'y avait pas d'acteur concurrent. En 1964, les acteurs sont nombreux et influents, la situation est très différente. En 1964, le LNE / Cnam peut prétendre à un rôle de coordinateur, difficilement d'intégrateur, et de nombreuses institutions sont dans le jeu. Ce moment de diagnostic, en 1964,

⁷ [Archives du Cnam, PV du Conseil d'administration - Annexe, 1964, p. 88]

⁸ Jean Terrien termine son rapport au Conseil d'administration du Cnam par ces mots : « Au cours des discussions du groupe de travail une idée essentielle s'est dégagée. Le Laboratoire d'Essais est à un tournant de son existence. Il dispose de moyens importants, d'un matériel moderne, d'un personnel qui n'est dépourvu ni de qualité, ni de dévouement. Mais il ne pourra vivre et se développer que s'il renonce à une excessive polyvalence et si on réforme son organisation. Le groupe de travail a estimé qu'il fallait donner à ce laboratoire, dont l'utilité n'est pas contestable, les moyens d'accomplir cette évolution. Mais il insiste sur la nécessité de rompre brutalement avec le passé et de prendre un nouveau départ ».

est un acte fondateur qui va nourrir les épisodes suivants, ceux de l'invention d'une solution véritablement opérationnelle pour le LNE et l'ensemble de la métrologie française.

Une dernière mission pour Bellier : restructurer le LNE ?

Peu de décisions engageantes pour le Cnam sont prises à court terme, si ce n'est de combler le déficit du LNE qui continue de se creuser. Bellier suit les activités d'un LNE en attente de restructuration, qui sera finalement entamée en 1967. Le Conseil d'administration choisit de transformer effectivement le LNE, et donc la structure interne du Cnam (de par sa taille le LNE est structurellement trop important pour être évacué sans redéfinition du statut de l'établissement entier).

Le changement est rendu possible et même impératif au Cnam pour deux raisons. Le professeur Pierre Fleury (1894-1976) va quitter ses fonctions et prendre sa retraite au 13 octobre 1964⁹ : il était entré au Cnam pour enseigner la métrologie en 1932, nommé Professeur du Cnam en 1936 (Chaire de Physique générale dans ses rapports avec l'industrie)¹⁰. Les fonctions de Maurice Bellier prennent fin en 1967, âge théorique de sa retraite. Étant donné la phase de transition en cours se posera rapidement la question : faut-il confier une mission à M. Bellier pour assurer cette transition (en retardant l'heure de sa retraite) ou saisir l'occasion de passer le relais ?

Les décisions clé sont toutes prises très rapidement (sous l'impulsion de Pierre Aigrain, directeur de l'enseignement supérieur et présent au CA du Cnam) : accord global avec le rapport de 1964 ; « priorité absolue à la recherche métrologique »¹¹ ; création de la chaire de métrologie ; et prolongement pour deux ans de Bellier à la tête du LNE¹² avec pour mission sa transformation en « Laboratoire national de métrologie et d'essais ».

Bellier pilote une réorganisation découlant des conclusions du groupe de travail de 1964 : un service général, un Institut national de métrologie (INM), trois départements. Mais avec les souhaits exprimés au CA par la voix d'Aigrain, la recherche scientifique en métrologie doit trouver une dynamique et une priorité. Avec la titularisation d'André Allisy à la Chaire de Métrologie, le projet d'INM se précise¹³. Il est prévu que l'INM soit créé au sein du LNE (utilisant les services administratifs et techniques du LNE), en séparant donc de fait Recherche et Essais / contrôles, en deux services différents d'un même laboratoire. La Direction scientifique de l'INM serait assurée par le professeur titulaire de la Chaire de Métrologie. Il lui incomberait les tâches de recherche sur les étalons et de doter le LNE, prioritairement, des instruments de transfert adéquats.

Dans les faits, l'INM, qui se trouve géographiquement implanté rue Saint Martin, prend son autonomie sur les travaux scientifiques, grâce à une partie du personnel et du matériel du LNE, qui choisit de quitter le LNE : Bellier semble donner sa bénédiction à ces transferts, dont l'effet sera le développement spectaculaire de l'INM entre les mains d'Allisy.

⁹ Notice Pierre Fleury dans le Dictionnaire des Professeurs du Cnam (Fontanon, 1994).

¹⁰ Voir le texte de C. Fontanon et L. Petitgirard, ainsi que celui de M. Lecollinet consacré aux enseignements de métrologie, dans ce dossier. On trouvait ainsi des cours de métrologie dans les cursus de physique du Cnam bien avant la création d'une chaire dédiée à la métrologie. Cependant l'activité de Fleury était pour l'essentiel tournée vers l'Institut d'Optique dont il est directeur depuis 1945 (après le décès de Pierre Fabry) : Fleury s'inscrit dans une tradition française de l'optique qu'il s'est employé à développer.

¹¹ [Archives du Cnam, PVs du Conseil d'administration 1967].

¹² [Archives du Cnam, PV du Conseil d'administration 1967], Bellier est prolongé jusqu'en Décembre 1969, soit deux ans au-delà de sa cessation d'activité programmée en 1964.

¹³ Le premier projet de décret est présenté au Conseil de Perfectionnement le 23 avril 1968, puis discuté à nouveau le 15 octobre 1968, après l'arrêté signé le 2 octobre concernant la création de l'INM.

Fin de carrière

La redéfinition LNE / INM / Chaire de métrologie exclut progressivement Bellier. Il en fait lui-même le constat, écrivant le 10 novembre 1969 au président du CA sur sa situation. Concernant la mission qui lui a été confiée, il déplore que « les circonstances ne [lui] ont pas permis de l'exécuter »¹⁴. En 1969, le contexte a beaucoup changé : il s'agit en fait d'assurer la succession de Maurice Bellier après 20 ans à la tête du LNE. Le futur directeur se voit confier la mission de poursuivre le redressement du LNE : sur le fond de la problématique financière, les choses n'ont pas beaucoup évolué depuis 1964. Une nouvelle « Commission provisoire » (Comité scientifique et technique du LNE) se construit pour mettre en œuvre les conclusions du rapport de 1964 à l'échelle du LNE cette fois¹⁵. Elle sera portée par le nouveau directeur Laurent Citti¹⁶, nommé le 14 novembre 1969.

Cette fin de poste de direction du LNE est à l'image du mode de gestion assez peu clivant de Bellier : ne pas empêcher une dynamique qu'il pensait inéluctable (et importante en métrologie scientifique), chercher à ménager à la fois le LNE (en assurant la cohérence et la qualité des travaux du LNE) et le développement de l'INM, en lui transmettant les moyens des travaux de métrologie scientifique. Même si l'épilogue n'est pas tout à fait ce qu'il aurait souhaité, la transition est finalement assurée.

Maurice Bellier ne quittera le Cnam qu'en 1973 : les dernières années sont plutôt portées sur la poursuite de l'autre activité récurrente dans sa carrière, la formation. Durant 30 ans, il a publié des manuels pour l'enseignement technique qui seront souvent réédités plusieurs fois, fruits de collaborations évoluant dans le temps. L'électricité industrielle est la matière principale, dont il a su explorer tous les versants (Galichon et Bellier 1978), jusqu'à certains développements de l'électronique par exemple (Bellier et Galichon 1962).

BIBLIOGRAPHIE

Bellier, Maurice. 1962. *Électricité*. Paris, France: Delagrave.

Bellier, Maurice, et André Galichon. 1962. *Électricité industrielle: électronique à l'usage des lycées techniques et des techniciens de l'industrie*. Paris, France: Delagrave.

Bellier, Maurice, André Galichon, et François Lucas. 1976. *Électricité industrielle..* Paris, France: Delagrave.

¹⁴ Arch. Cnam, Dossier Bellier – Lettre de M. Bellier au Président du Conseil d'administration du Cnam du 10 novembre 1969.

¹⁵ [Archives du Cnam, Procès-Verbal du Conseil d'Administration-1969]. Le contexte évolue également dans le sens où le Ministère de l'industrie montre un intérêt croissant pour le LNE, le ministère de l'Education nationale étant plus portée sur l'INM : la Commission se compose en fonction de ces mouvements et intentions, et la délégation du Ministère de l'industrie sera plus importante. En toile de fond économique et politique, n'oublions pas que le président de la République depuis le 20 juin 1969 est désormais Georges Pompidou, dont les faveurs vont à l'amplification du développement industriel de la France.

¹⁶ Celui-ci est né en 1938, le changement de génération par rapport à Maurice Bellier est assez radical. Il vient des sciences physiques et travaille alors à la DRME depuis 1964, comme conseiller scientifique : la DRME et la DGRST, avec l'impulsion de Aigrain, ont été moteurs de la restructuration de la métrologie nationale (Petitgirard 2015).

Brucy, Guy. 2005. "L'enseignement technique et professionnel français." *Cahiers de la recherche sur l'éducation et les savoirs*, no. 4 (September):13–34.

Galichon, André, et Maurice Bellier. 1978. *Électricité industrielle...., Machines électriques*. Paris, France: Delagrave.

Pastouriaux, Louis, Arthur Varoquaux, and Maurice Bellier. 1946. *Électricité industrielle: à l'usage des Écoles nationales professionnelles (2e et 3e années);, des sections d'électricité des Écoles pratiques, et des Écoles d'Electricité industrielle. 1ère et 2ème parties, Courant continu*. Paris, France: Delagrave.

Pelpel, Patrice, et Vincent Troger. 1993. *Histoire de l'enseignement technique*. Hachette Éducation.

Petitgirard, Loïc, ed. 2015. "Le Cnam et La Métrologie Nationale Depuis Les Trente Glorieuses," *Cahiers d'histoire du Cnam*, 3 (1).

Rouard, Pierre. 1937. "Études des propriétés optiques des lames métalliques très minces." *Annales de Physique* 11 (7):291–384. <https://doi.org/10.1051/anphys/193711070291>.

Honneurs

Juin 1952 : Chevalier de la Légion d'Honneur.

Archives / sources

- Archives Cnam : P.V. du CA et CP sur la période 1949-1969 / Dossier Maurice Bellier
- Entretien avec Laurent Citti (par Loïc Petitgirard) le 11 décembre 2014
- Entretien avec André Allisy (par Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard) le 12 décembre 2012.

Annexe – Notice biographique de Jean Girerd - Chaire de Génie logiciel - Ingénierie

À paraître dans le Volume 2 du *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* (1945-1975) – dirigé par Claudine Fontanon, André Grelon, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

Girerd, Jean (26 septembre 1930 - août 2013) – Chargé de cours « Formulation mathématique des systèmes physiques » (1965-1980) - Titulaire de la Chaire « Génie logiciel - Ingénierie » (1980-1991)

Loïc Petitgirard - Cnam

L’empreinte du professeur Jean Girerd dans l’histoire du Cnam est singulière, complexe et couvre plus de trente années de service. Cas rare dans l’histoire du Cnam, il est lui-même le fils d’un professeur du Cnam, Henry Girerd (et c’est un cas unique car il ne lui succède pas sur la même chaire). Pour lui, le Cnam a été tout à la fois une filiation, un titre, une forme de légitimité, une opportunité et un refuge même si sa présence dans les lieux a été parfois épisodique. Entré au Cnam en 1957 dans les pas de son père, il mène une longue carrière. Avant d’être élu professeur de manière tardive (1980) à la chaire « Génie logiciel – Ingénierie », il a exercé plusieurs charges au Cnam : vacataire d’enseignement, titulaire de cours, chef des travaux. Il quitte le Cnam en 1991, pour se consacrer à de nombreuses autres activités qui l’ont occupées en parallèle du Cnam, en matière technique, industrielle, parfois plus artistique ou encore politique. Ce parcours, dont nous allons expliciter les étapes et les contraintes, se double d’un caractère et d’une personnalité hors du commun, qui ont pu alternativement jouer en sa faveur et le desservir. Les faibles collaborations scientifiques au sein du Cnam et son absence dans la construction du laboratoire d’informatique dans les années 1980 en sont des marqueurs.

Formation

Revenons d’abord sur les origines et la formation de Jean Girerd, puis ses premiers succès d’ingénieur, qui constituent le temps fort incontestable de sa carrière. Né à Ivry-sur-Seine en banlieue de Paris le 26 Septembre 1930, Jean Girerd sera l’aîné de 10 enfants. Son père Henry Girerd est alors un ingénieur aéronautique qui va se révéler brillant, pris entre des études à la Faculté des sciences de Paris, le Collège de France (il est assistant du Professeur de mécanique animale appliquée à l’aviation, Antoine Magnan) et l’Institut Aérotechnique de Saint-Cyr (institut rattaché au Cnam, où il travaille avec Albert Toussaint, Professeur du Cnam). Sa mère Jeanne André de l’Arc est issue d’une grande famille auvergnate, dont l’ascendance remonte à Jean André de l’Arc, nommé Contrôleur de la Reine Marguerite de Valois, seigneur de l’Arc et de Fornies. Cette ascendance noble constitue un héritage et une symbolique assez forte, et Jean Girerd se fera volontiers appeler Jean « Girerd de l’Arc » dans les dernières années de sa vie. Son enfance et son adolescence se passent aux côtés de sa mère et de sa fratrie dont il doit s’occuper, dans le contexte de la guerre et de l’Occupation, avec un père happé par le développement accéléré de l’aéronautique. À partir de 1938, en effet, Henry Girerd est, à la SNCASO (Société Nationale de Construction Aéronautique du Sud-Ouest), occupé aux calculs de profils et à l’étude des fuselages : c’est pour ces études qu’il va réaliser et utiliser le type de calculateurs électriques inventé par les physiciens Joseph Pérès et Lucien Malavard dans les années 1930 (des calculateurs analogiques et des cuves rhéologiques). Il met également sur pied

une nouvelle soufflerie à Cannes (dès 1941) avant de participer à la mission de remontage d'une soufflerie allemande (récupérée après-guerre) dans les Alpes, à Modane.

Vivant à Paris après la Libération, Jean Girerd est scolarisé au Lycée Louis Le Grand, avec une ambition : entrer à l'École Polytechnique. Malgré deux tentatives en 1950 et 1951, il échouera au concours d'entrée, ce qui le hantera toute sa vie. Il suit un cursus pour devenir ingénieur en 1952 à l'ESME (École Supérieure de Mécanique et d'Électricité – dite « École Sudria ») spécialisée en électronique. Cette formation sera complétée ensuite, en 1955, par une spécialisation en Génie atomique qui a le vent en poupe. Mais le domaine qui marque ses premières années d'ingénieur est celui des calculateurs électroniques. Son père lui met le pied à l'étrier : Jean Girerd est d'abord ingénieur stagiaire à Cannes dans les laboratoires d'aéronautique établis par son père. Ce n'est qu'un passage bref en 1952, mais qui montre à coup sûr au jeune ingénieur que les calculateurs et les mathématiques sont les adjoints désormais indispensables à l'ingénierie aéronautique. Il fait une deuxième expérience comme ingénieur au Centre national d'étude des télécommunications (CNET) de septembre 1952 à février 1954, sur les dispositifs de pilotage automatique d'engins spéciaux (missiles sol-air SE4100 et missiles tactiques SE4200 - ces projets étant coordonnés par les services techniques de l'aéronautique pour l'Armement).

L'industrie naissante des machines mathématiques

Au fil des années 1950 les calculateurs deviennent des auxiliaires de la recherche scientifique et technique de plus en plus importants. Sur le versant des mathématiques appliquées, ces machines sont parfois appelées « machines mathématiques », employées dans les aspects les plus théoriques des recherches. Pour le calcul scientifique intensif, ce sont des « calculateurs électroniques », avec des versions « analogiques » ou « arithmétiques » (le terme « numérique » remplaçant plus tard le terme « arithmétique »). Balistique, aérodynamique, mécanique, physique, cryptographie, les domaines d'utilisation vont croissants. Dans le versant lié à la comptabilité ou la gestion, ce sont des systèmes « mécanographiques ». Toutes ses appellations seront progressivement remplacées par le terme générique « ordinateur » à partir de 1955, désignant les machines à calculer et à traiter l'information, aux usages diversifiés.

Dans l'environnement technique français de l'après-guerre, cependant, la situation est à la pénurie : pas ou peu de constructeurs de machines d'un côté, et faibles demandes explicites pour ces machines encore mal connues du côté des laboratoires de recherche (universitaires ou industriels). Avec une recherche publique atone sur le sujet, et peu d'industriels engagés dans la conception de calculateurs, les services de l'Armement jouent un rôle important de stimulant de la création de laboratoires et d'entreprises (Mounier-Kuhn, 1998). L'aéronautique étant là-encore en première ligne. Mais tout est à construire et à développer : c'est dans cette voie que Jean Girerd s'engage comme ingénieur électronicien.

En février 1954 il entre aux Laboratoires René Derveaux pour développer des nouveaux calculateurs électroniques. Le défi est technique, industriel et commercial car il s'agit d'entrer en concurrence avec le seul autre constructeur français de l'époque, la SEA (Société d'Électronique appliquée à l'Automatisme) de François-Henri Raymond impliquée dans tous les réseaux militaires et civils de cette industrie de l'électronique et de l'ordinateur naissante (Mounier-Kuhn, 1998 et 2010).

La gamme de calculateur qui fait le succès des Laboratoires Derveaux est baptisée « Djinn » : pour l'anecdote, il s'agit du prénom « Jean » prononcé en anglais, ce qui n'est autre que le surnom donné à Jean Girerd par son épouse Pierrette Ader. Cela marque symboliquement sa paternité sur ce calculateur analogique électronique.

Le CEA est le premier client de cette machine. Ce sera aussi l'opportunité pour Jean Girerd d'approcher la physique de l'atome, avec une formation de 6 mois à Saclay en 1955 pour devenir ingénieur du Génie atomique (à l'IGA - Institut du génie atomique - qui devient en 1956 l'INSTN - Institut national des sciences et techniques nucléaires - avec le projet plus ambitieux de former les ingénieurs manquant au développement du nucléaire civil et militaire en France). Jean Girerd a été de la toute première promotion des 24 ingénieurs de l'IGA en 1955. Il suivra régulièrement et annuellement des formations de mise à jour sur le sujet.

Au sein des Laboratoires Derveaux, il est chargé d'étude et de développement de plusieurs systèmes, dont un centre de calcul incluant plusieurs machines Djinn, destiné à démontrer les capacités de ces machines. Il devient adjoint au directeur technique, et il pilote la conception du nouveau type de machine mixte « analogique-arithmétique » : c'est encore pour les Services techniques de l'aéronautique qu'il réalise un dispositif de visée pour bombardement couplant optique, système radar et calculateur mixte.

Dans les années 1950, il s'agit de faire la promotion des calculateurs électroniques, dispositifs mal connus et d'utilisation complexe. Pour cette raison, Jean Girerd se familiarise avec toute une gamme de problématiques mathématiques qui sont autant de domaines d'application de ces calculateurs : il privilégie l'aérodynamique (toujours), la balistique, la neutronique (pour les besoins du génie atomique), les régulations. En termes plus récents, il faut démontrer l'utilité des machines pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes, pour les laboratoires industriels ou scientifiques, pris dans le développement technique exponentiel de l'après-guerre. De plus, promouvoir les machines mathématiques, c'est aussi enseigner et former la génération d'ingénieurs à venir, une tâche qui lui tiendra à cœur.

En août 1958, il quitte les Laboratoires Derveaux, pour un nouveau défi industriel, au sein de l'entreprise Précision Mécanique Labinal (PML). Cette entreprise est la fusion de deux entreprises existantes nommées « Précision Mécanique » et « Labinal », cette dernière s'étant faite une réputation dans l'équipement aéronautique. En 1958, la nouvelle entreprise voulant prendre le tournant de l'électronique, Jean Girerd est recruté comme chef du Service d'études électroniques pour assurer la création d'un Laboratoire et des Ateliers de maquettage et fabrication. Il développera plusieurs appareils industriellement : un dispositif de télécommande pour engins spéciaux (pour Nord Aviation), un nouvel analyseur différentiel Delta 600 (calculateur mixte analogique-arithmétique pour la résolution des équations aux dérivées partielles). Au tournant de 1960 cependant, la seule machine qui connaît un succès relatif reste la Djinn, vendue à quelques dizaines d'exemplaires. Il nous est aujourd'hui impossible de dire combien de Delta 600 ont été construites, mais il est probable que ce fut un échec commercial, car aucune trace d'achat n'a été trouvée à ce jour dans les centres de calcul ou laboratoire de mathématiques appliquées (ou d'informatique, terme encore peu employé à l'époque) en France. Même si l'heure est au développement de l'informatique, les succès ne sont pas faits d'avance et la concurrence est rude : après la SEA, plusieurs groupes industriels français (dont la CSF et Télémécanique) vont concevoir des grandes machines, analogiques ou hybrides (comme l'Analac) ; il faut aussi compter les importations de machines américaines EAI. Les petites entreprises PML et Derveaux n'ont pas la taille critique pour rivaliser longtemps avec les grands acteurs du marché des ordinateurs.

Quittant PML en novembre 1961, il s'engage dans une autre aventure industrielle avec plusieurs ingénieurs de sa connaissance en lançant la SIDEN (Société Industrielle de Développement Électronique et Nucléaire) dont, cette fois-ci, il est fondateur et PDG. SIDEN est fondée comme

S.A. filiale du groupe Luchaire et Messier, deux entreprises de l'aéronautique. SIDEN compte quatre départements pour autant d'ambitions : les calculateurs spéciaux (Djinn et Delta 600 sont au catalogue, et c'est la principale ressource de la SIDEN), l'enregistrement magnétique (télécommandes, télémessures), l'électronique médicale, les techniques du vide. La SIDEN est à l'image de l'expérience accumulée dans les années 1950 par Jean Girerd, toujours en orbite du monde de l'aéronautique (et jamais très loin de son père), pour des questions techniques et des problématiques de financement de ces entreprises : les réseaux du père deviennent aussi ceux de Jean Girerd, qui étend son réseau du côté « atomique » avec ses travaux pour et avec le CEA.

Dans les enseignements de « Machines mathématiques » au Cnam

Dans la même période il fait ses armes au Cnam en qualité d'enseignant vacataire (1957-1963) sur la question des « méthodes de calcul analogique » et de la « programmation sur ordinateur électronique ». Difficile de dissocier cette entrée au Cnam de la présence de son père au sein de l'institution, arrivé en 1949, nommé professeur du Cnam en 1951 et déjà auréolé de multiples succès scientifiques et techniques. Mais Jean Girerd n'entre pas à la chaire d'Aéronautique : il dépend du département de Physique, et enseigne également aux départements de Mathématiques et d'Électronique et Automatique. Il faut dire que la question des calculateurs, des ordinateurs et de la programmation entre par des chemins complexes dans le Cnam : aussi bien par le développement de cursus de formation en comptabilité, en « mathématiques appliquées » en physique qu'en électronique et automatique (Neumann, Petitgirard, Paloque-Bergès, 2016). C'est François-Henri Raymond, fondateur et directeur de la SEA qui est actif sur ce terrain de l'automatique au Cnam dans les années 1950. Mais Girerd est dans le comité de 1957 d'organisation de l'enseignement de l'automatisme au Cnam, chargé des exposés sur les méthodes de calcul analogique. Il interviendra par la suite dans le cursus « Programmeur » du département de Mathématiques (le brevet de Programmeur a été ouvert en 1957, il intervient à partir de 1959).

Jean Girerd a une triple activité : ingénieur d'étude (Derveaux, puis PML), enseignant au Cnam, et en préparation d'une thèse de doctorat, sous le patronage de Joseph Pérès (Mécanicien, Doyen de la Faculté des sciences de Paris) et Lucien Malavard (physicien, aux commandes du Laboratoire de Calcul Analogique du CNRS). Girerd finalise sa thèse en 1959 sur le thème de l'« Analyseur différentiel électronique non linéaire de grande stabilité » (Girerd, 1959). Il s'agit ni plus ni moins de l'analyse complète de la machine dont il dirige la conception : le ordinateur Djinn. Comme l'indique le titre, Djinn s'inscrit très directement dans la lignée des « analyseurs différentiels » imaginés par Vannevar Bush au MIT dans les années 1930. En 1955, ces machines analogiques sont entièrement électroniques, dépassant leurs prédécesseurs (Bush, 1931 ; Owens, 1986 ; Care, 2010). D'un point de vue technique et industriel, l'électronique fait la nouveauté de cette machine ; d'un point de vue académique et mathématique, cela ne justifie pas une thèse dans le domaine des Mathématiques appliquées. Le versant le plus neuf de sa thèse est donc ailleurs, dans l'utilisation du ordinateur pour résoudre des problèmes mathématiques : trouver des solutions aux équations non linéaires du type Matthieu et Hill (qui décrivent des comportements oscillants, vibratoires, en mécanique ou en acoustique notamment), qui n'ont pas de solution mathématique simple et calculable à la main.

Tout cela traduit bien le réseau français dans lequel Jean Girerd est impliqué et dans lequel il développe le sujet des calculateurs : entre l'aéronautique et la physique atomique d'un côté et le développement des laboratoires de calcul plus universitaires, préliminaires à des laboratoires

de mathématiques appliquées et d'informatique. L'Institut d'Aérotechnique de Saint-Cyr l'École, au sein du Cnam, achète une machine Djinn pour ses besoins. Piloté par Pérès et Malavard, le Laboratoire de Calcul Analogique a été créé en 1946 au sein de l'Institut Blaise Pascal du CNRS, et il est en plein développement au fil des années 1950. Ce laboratoire s'équiperait aussi d'une machine Djinn et d'autres systèmes analogiques, lesquels seront mis à disposition pour assurer les travaux pratiques des cours de Jean Girerd au Cnam.

Jean Girerd devient ensuite Chef de travaux « Machines mathématiques » (1963-1965) avant d'être titularisé sur une charge de cours (1965-80) « Formulation mathématique des systèmes physiques ». Mais la clé du développement de la formation en informatique est entre les mains d'un autre ingénieur et enseignant : Paul Namian. C'est lui qui obtiendra le poste de professeur titulaire de la chaire « Machines mathématiques » en 1966. Ils ont un passé commun dans la conception et construction de ces calculateurs, car Namian travaillait à la SEA un des principaux constructeurs de l'époque et principal concurrent des Laboratoires Derveaux sur le créneau des calculateurs analogiques. Leurs profils peuvent se rapprocher sur certains points, mais les ambitions sont différentes. Namian choisira une orientation dans l'informatique de gestion, abandonnant la question de la conception des machines. Girerd restera un pied dans les machines, l'autre dans leur utilisation pour le calcul scientifique, la modélisation et la simulation pour l'ingénieur.

Les cours de Girerd sont à l'image de ce qui est attendu des enseignants du Cnam : l'expertise industrielle mise au service de la formation des techniciens, ingénieurs et cadres de l'industrie. Dans ses cours, il donne avant tout les règles générales et les méthodes pour mettre en équation les systèmes physiques, qu'ils relèvent de la physique avancée ou des problèmes très concrets des ingénieurs. Vient ensuite tout le travail de préparation pour le traitement sur machines mathématiques (analogiques ou arithmétiques) et la phase de calculs proprement dite.

Hors du Cnam, Jean Girerd multiplie les vacations de cours : en 1964 il inaugure un cours de « Machines mathématiques » à l'École nationale supérieure de chimie de Paris ; à partir de 1970 il enseigne également à l'ENSAM (Ecole nationale supérieure des Arts et Métiers), dans l'enseignement de Physique à destination des futurs ingénieurs. Fort de son expérience d'enseignement, il publie un ouvrage en 1968 intitulé *Traitement des équations différentielles sur calculateurs électroniques* (Girerd et Karplus, 1968). Il est le fruit d'une collaboration de longue durée avec Walter Karplus, un spécialiste des calculateurs analogiques exerçant aux États-Unis à l'UCLA (University of California Los Angeles). Le traité bénéficie de l'expérience américaine sur le sujet, ce qui en fait un ouvrage singulier et important dans le paysage français, mais peu original du point de vue du monde académique anglophone.

Cette collaboration de longue durée met en lumière un autre aspect de l'évolution de l'informatique : en France, comme à l'international, le tempo est donné par la recherche et l'industrie des États-Unis, leader du secteur notamment avec IBM. Girerd, comme beaucoup d'autres, participe à une acclimatation des techniques américaines en France, en particulier du « génie logiciel » à partir des années 1970.

La fin des années 1960 marque alors un tournant dans la trajectoire de Jean Girerd au Cnam et dans ses entreprises diverses. Dans la carrière de Jean Girerd on ne trouve que deux publications importantes : sa thèse de 1959 et son ouvrage de 1968. Il n'existe pas d'autres publications

scientifiques, ni antérieure ni postérieure à 1968, ce qui paraît étonnant ; plusieurs raisons peuvent l'expliquer.

La première touche à sa spécialisation dans le calcul analogique dans les années 1950 avec ses premières expériences industrielles : au fil des années 1960, les machines numériques (qui sont nos ordinateurs actuels) gagnent du terrain sur les machines analogiques, qui bientôt ne pourront plus rivaliser. Même si en termes d'usages les deux technologies ne s'opposent pas toujours, les systèmes analogiques reposent sur des signaux continus, alors que le numérique s'impose sur autre base, le binaire « 0 ou 1 ». Par ailleurs, les systèmes numériques deviennent plus rapides, plus précis et d'usage plus général. Les compétences dans le domaine analogique deviennent donc rapidement obsolètes, et la nouvelle génération d'ingénieurs et d'informaticiens est formée sur les ordinateurs numériques. Même s'il suit évidemment les évolutions du secteur, avec les machines « mixtes » puis numériques, Girerd n'est plus au centre du jeu, d'autant qu'il a évolué du côté entrepreneurial vers d'autres horizons.

Par ailleurs, en 1967 il s'est engagé dans une affaire d'un autre ordre, avec la création de l'« Office technique pour l'équipement du territoire ». Derrière ce titre un peu vague, se trouve le projet de constituer un équivalent français de l'ARD (American Research and Development Corporation) fondée par le général Georges Doriot, un célèbre professeur de Management à l'Université d'Harvard. Il s'agit pour Girerd de créer un organisme destiné à accompagner les inventeurs dans le développement industriel et commercial de leur affaire. L'ambition est nouvelle, non sans succès et déboires. Mais elle éloigne Girerd progressivement de l'industrie informatique à proprement parler car les projets soutenus sont tous azimuts, et non pas liés à cette industrie. Avec ses aventures industrielles et financières, il prend aussi ses distances avec le monde académique.

Il faut également souligner que Jean Girerd a été toute sa vie professionnelle un ingénieur dans tout ce qu'il a entrepris, et un ingénieur très attaché à la pratique. Sa devise devrait être « le meilleur moyen d'apprendre c'est de pratiquer ». Son père, lui aussi ingénieur, avait évolué vers une carrière brillante en physique (expérimentale), Jean Girerd n'aura pas cette trajectoire : c'est à la fois un choix personnel et le résultat de contraintes multiples, voire d'une carrière contrariée. Enfin, son père décède en 1973, mort qui marque symboliquement la fin d'une période durant laquelle il a été un allié précieux de la carrière de Jean Girerd.

Une carrière sous contraintes

La consultation de ses archives personnelles et les entretiens avec les membres de sa famille révèlent d'autres facettes du personnage. Jean Girerd est un professeur très singulier, à la fois inscrit dans l'histoire du Cnam et pourtant régulièrement occupé à mille autres projets simultanément, au point qu'il peut être perçu comme assez absent du 292 rue Saint Martin, après 1970. C'est du côté de Nice et du Cnam en développement en région Provence Alpes-Côte d'Azur qu'il faut alors chercher sa trace. Pour des raisons personnelles tout d'abord, parce qu'il s'éloigne de Paris, défriche un vaste terrain sur les hauteurs de Grasse pour construire sa demeure, à sa mesure. Il quittera complètement ses appartements parisiens en 1986 mais assure néanmoins des aller-retours réguliers sur Paris dans toutes ces années.

Jean Girerd participe aussi pleinement du développement du Cnam au niveau local. En 1975 il est nommé Directeur des études de l'Institut français d'ingénierie (INFI), instauré au Cnam Nice. Il renoue avec la formation et la promotion du métier d'ingénieur. Mais il n'est toujours pas titulaire d'une chaire et n'a pas le titre de Professeur du Cnam, ce à quoi il aurait logiquement pu prétendre plus tôt, comme continuation de sa charge de cours : peut-être est-ce

dû à son éloignement au fil des années 1960, au fait que d'autres ont été titularisés entre temps (notamment Paul Namian en 1966) et à son caractère parfois jugé difficile. Toujours est-il qu'il parvient à être nommé au Conseil d'administration du Cnam en 1978, et pourra accéder à une chaire en 1980. La chaire « Génie logiciel- Ingénierie » est à sa mesure, mais elle provoquera un certain remous au niveau du Cnam à Paris : en effet, elle interfère avec les projets des informaticiens au Cnam Paris, qui élaborent un programme de recherche sur les systèmes informatiques et qui cherchent eux aussi une reconnaissance et une légitimité de l'institution. Or Jean Girerd n'y participe pas, occupé à ses projets dans le sud de la France, et retarde, en quelque sorte, la nomination de Claude Kaiser à la chaire « Informatique-programmation » qui sera ouverte l'année suivante seulement (Paloque-Bergès et Petitgirard, 2017).

Du côté de l'INFI à Nice, Girerd élabore les cursus de formation des ingénieurs, en continuité de ses enseignements en informatique à Paris, et avec son expérience industrielle. Mais il existe une face cachée à cet aspect ingénieur : Jean Girerd a entretenu très tôt le rêve de devenir physicien, et plus précisément physicien théoricien. On trouve des traces nombreuses de ses recherches très personnelles, des mémoires qu'il n'a jamais publiés : c'est d'ailleurs la première faiblesse de tout son travail, puisqu'il n'a pas été discuté, ni critiqué par ses pairs. Il cherchait à se mettre dans les pas des physiciens travaillant sur la relativité générale et la physique des particules. Il s'agit probablement d'une véritable passion de Girerd pour cette physique, science reine du milieu du 20^e siècle. Il place d'ailleurs Albert Einstein très haut dans son panthéon personnel, aux côtés de Robert Oppenheimer (et d'autres scientifiques, comme le logicien Kurt Gödel). Difficile de retracer les contacts qu'il a pu avoir dans le milieu de la recherche sur ces sujets, mais il était pratiquement impossible de développer de telles recherches hors d'un laboratoire, sans équipe, en solitaire. On peut préjuger du fait qu'il a échangé avec Louis Leprince-Ringuet, physicien français majeur du second XX^e siècle, professeur au Collège de France : la connexion est aussi personnelle, car il était camarade de classe de Dominique Leprince-Ringuet, fils de ce physicien. Tout cela donne un autre sens à son implication dans le génie atomique et les travaux menés pour le CEA, en neutronique : il aurait probablement souhaité poursuivre des travaux en physique nucléaire, mais il a fait avant tout un travail remarquable d'ingénieur et de spécialiste du calcul scientifique.

Ses projets ont été probablement contrariés assez tôt, quasiment dès son échec à Polytechnique, alors que Dominique Leprince-Ringuet réussit le concours... et que Louis Le prince Ringuet y est professeur de physique (1936-1969) en même temps qu'il sera commissaire à l'énergie atomique (CEA – 1951-1971). Cette école lui aurait ouvert la voie rêvée. Ne négligeons pas non plus la charge d'aîné de 9 frères et sœurs dont il dit souvent qu'elle a pesé sur ses choix. Être physicien restera un rêve, la physique une passion, plus qu'une profession.

Reconnaissance

Des années 1950 jusqu'à sa retraite, il reste dans cet entre-deux un peu paradoxal : conquérir une reconnaissance du côté universitaire, académique, alors que sa reconnaissance professionnelle est acquise dans le monde industriel. Cette quête est probablement marquée par l'admiration d'un père physicien brillant et ses tentatives de dépasser son statut d'ingénieur pour devenir physicien. Ce qui explique également l'importance d'accéder au titre de Professeur du Cnam, titre académique mais qui fait oublier que le Cnam est un établissement assez atypique dans son corps professoral.

Le prix qu'il reçoit en novembre 1979 est tout à l'image de ce paradoxe : la « Médaille d'Or de la société d'encouragement pour la recherche et l'invention » lui est attribuée pour ses travaux

sur équation de Hill, Mathieu, Fredholm, Volterra (dans une continuité de ses recherches de thèse), pour la détermination théorique de la répartition spatio-temporelle des flux neutroniques dans les réacteurs nucléaires (ses travaux en Génie atomique, mais qui ne sont pas ceux qu'il poursuit en solitaire) et la conception des premiers calculateurs français, préliminaire à sa spécialisation en génie logiciel.

En prenant sa retraite du Cnam en 1991, il fait aussi le choix de se consacrer à ses nombreuses autres activités. Il a été ingénieur, industriel et constructeur, mais pas toujours heureux en affaires. Il reste un multi-entrepreneur infatigable, oscillants entre affaires personnelles et professionnelles. Il cultive sa passion pour la musique, la peinture, l'élevage de chiens de chasse « pointers » ; et il est aux côtés de Michel Rocard, en tant qu'expert scientifique, lors de la campagne électorale pour la présidentielle de 1988 ; dans les années 1990 il se fait nommer expert judiciaire en informatique (à la Cour d'Appel d'Aix-en-Provence). Il conserve quelques rêves d'ingénieur en génie atomique, après avoir mis, semble-t-il, de côté ses rêves de devenir physicien théoricien.

Avec ses idées et ses fulgurances, Jean Girerd a fait beaucoup de coups d'éclat, parfois ingénieux, parfois voués à l'échec ; il a pu compter à de nombreuses reprises sur ses réseaux professionnels ou familiaux pour s'en sortir. Il possède une grande culture scientifique et technique, il a marqué le développement des calculateurs analogiques en France, puis accompagner l'émergence du génie logiciel en France, en important beaucoup de la culture technique américaine. C'est par la pratique, le faire, l'apprentissage sur le terrain industriel, avec et pour les ingénieurs qu'il y est parvenu.

Sources

Entretiens avec Luc Girerd (à titre indicatif, il a fait de sa relation avec son père Jean Girerd un roman : *Éloge du père qui m'assassina* – Albin Michel, 2003).

Archives personnelles de Jean Girerd (conservées à son ancien domicile, Le Tignet – 06530).

Archives du Cnam – Dossier Jean Girerd / Provès-verbal du CA et CP.

Notices biographiques de : Henry Girerd, Albert Toussaint, Paul Namian.

Biblio.

BUSH Vannevar, 1931, « The differential analyzer. A new machine for solving differential equations », *Journal of the Franklin Institute*, Octobre 1931, vol. 212, no 4, p. 447-488.

CARE Charles, 2010, *Technology for Modelling: Electrical Analogies, Engineering Practice, and the Development of Analogue Computing*, Springer London Ltd, 203 p.

GIRERD Jean et KARPLUS Walter, 1968, *Traitement des équations différentielles sur calculateurs électroniques*, Paris, France, Gauthier-Villars, 559 p.

GIRERD Jean, 1959, *Sur un analyseur différentiel électronique non linéaire de grande stabilité. Application à l'étude des solutions générales des équations de Hill et de Mathieu*, Thèse, Université de Paris - Faculté des sciences.

MOUNIER-KUHN Pierre, 1998, « Calculateurs électroniques et nouveaux systèmes d'armes : Interactions Armées/ Recherche/ Industrie (1946-1959) » dans *La IVe République et les problèmes d'armement*, Paris, Centre d'études d'histoire de la Défense - ADDIM, p. 376-405.

MOUNIER-KUHN Pierre, 2010, *L'informatique en France*, Paris, Presses de l'Université Paris-Sorbonne.

NEUMANN Cédric, PETITGIRARD Loïc et PALOQUE-BERGES Camille, 2016, « Le Cnam : un lieu d'accueil, de débat et d'institutionnalisation pour les sciences et techniques de l'informatique », *Technique et Science Informatiques*, 2016, vol. 35, no 4-5, p. 584-600.

OWENS Larry, 1986, « Vannevar Bush and the Differential Analyzer: The Text and Context of an Early Computer », *Technology and Culture*, 1986, vol. 27, no 1, p. 63-95.

PALOQUE-BERGES Camille et PETITGIRARD Loïc, 2017, « L'émergence d'un laboratoire de recherches en informatique au Cnam (1968-1990) et le rôle de la recherche sur les Systèmes », *Cahiers d'histoire du Cnam*, 2017, vol. 7-8 (I), p. 9-20

Annexe – Notice biographique de René Chenon – Chaire de mathématiques appliquées aux arts et métiers

À paraître dans le Volume 2 du *Dictionnaire biographique des Professeurs du Cnam* (1945-1975) – dirigé par Claudine Fontanon, André Grelon, Camille Paloque-Bergès, Loïc Petitgirard

René Chenon (27 avril 1912 - 2 octobre 1993) - Chaire de Mathématiques appliquées aux arts et métiers (1967-1980).

René Chenon est né le 27 avril 1912 à Paris. Après sa formation scientifique, il choisit la voie qui deviendra sa vocation : l'enseignement des mathématiques. Il entame sa carrière d'enseignant en 1935, à Pontivy, puis devient professeur agrégé en 1936 et enseigne au Lycée Carnot à Dijon. Le service militaire (1937-38) interrompt une année sa prise de marque dans l'enseignement, et l'année suivante au Lycée Massena à Nice sera écourtée par le début de la guerre : René Chenon est rappelé en activité militaire le 23 mars 1939, puis mobilisé le 2 septembre 1939. Fait prisonnier lors des premiers combats, le 7 juin 1940, il passe l'essentiel de la guerre en captivité. Il est libéré le 24 mai 1945.

La Croix de guerre le distinguera pour faits de guerre, mais ne lui permettra pas de rattraper ce handicap de quatre années d'interruption dans sa progression de carrière, y compris et surtout dans ses visées en direction de l'enseignement supérieur et la recherche.

Au sortir de la guerre il est affecté à nouveau comme enseignant de mathématiques au Lycée J. Decour Paris (1945-54) avant de tenter l'aventure de la recherche. Il est accepté en détachement au CNRS, comme attaché de recherche dans la section de Physique théorique, et participe à la recherche en physique au sein du groupe de Louis de Broglie, qui fait encore figure d'autorité presque incontestable en physique théorique dans les années 1950. L'épisode est certes formateur, mais pas concluant pour Chenon. Il publiera plusieurs travaux dans le domaine de la théorie des champs (classique et quantique) mais ne parviendra pas à terminer une thèse dans le domaine.

Chenon retourne dans l'enseignement, en classe de Mathématiques spéciales, au Lycée Jean-Baptiste Say à Paris (1958-61), avant de rejoindre le Cnam en 1961 comme chef de travaux puis maître assistant. Il est accueilli dans l'équipe enseignante de mathématiques sous le patronage d'Alexis Hocquenheim, équipe qu'il dirige en duo avec Paul Jaffard. Chenon est alors chargé du cours de mathématiques préparatoires, puis mettra sur pied le cours de Calcul des probabilités et statistique mathématique (cours créée en 1963-64).

Il est pour ainsi dire un stakhanoviste de l'enseignement : en plus de toute l'implication que demande les cours au Cnam, il est professeur à l'Ecole nationale supérieure de Chimie de Paris (1962-66), il donne des cours à l'Ecole centrale des arts et manufactures (cours d'algèbre moderne à un niveau perfectionnement).

À côté des questions de physique mathématique, Chenon porte un intérêt aux problèmes algébriques et arithmétiques de nature combinatoire. De manière plus générale, il faut souligner que Chenon est très ouvert et cultivé dans le champ des mathématiques. Il est par exemple très attiré par l'application des mathématiques aux sciences humaines : il participe un temps au

séminaire du professeur Georges-Théodule Guilbaud, à l'Ecole pratique des Hautes études, où il propose un modèle mathématique de propagation des opinions et des modes. Chenon est accessoirement au comité de rédaction de la “Revue critique”, fondée par Georges Bataille en 1945, illustrant les nombreux centres d'intérêt du personnage. Son arrivée au Cnam est enfin marquée par une autre ambition, celle de l'utilisation des machines à calculer numériques, espérant qu'un laboratoire de calcul sera installé au Cnam pour mener des recherches “expérimentales” (c'est le terme choisi par Chenon) relatives à ses problèmes calculatoires. Telle est l'expérience de Chenon lorsqu'il présente sa candidature pour devenir professeur au Cnam : l'épisode n'est cependant pas sans péripéties.

Avec le départ à la retraite de P. Jaffard, la Chaire de “Mathématiques appliquées aux arts et métiers” est renouvelée, annoncée vacante en juillet 1966 et donc ouverte à candidature. S'en suit une petite vague de candidatures, cinq dossiers seulement parviennent au Cnam, dont celui de Chenon. Suite aux désistements de ses quatre concurrents, Chenon se retrouve *in fine* seul en lice pour la chaire ! La procédure connaît alors un flottement. La crainte d'une invalidation par l'Académie des sciences, si un seul candidat est placé en ligne pour le poste, pousse A. Hocquenghem à proposer d'infléchir la procédure en deux temps : vérifier que l'Académie ne s'opposera pas à une candidature unique et relancer un appel à candidature, plus affirmé, en direction des collègues des Facultés pour que des candidats viennent se présenter. Peine perdue, au grand regret des commissions successives chargées de recruter le successeur de Jaffard ; en novembre 1966, Chenon est bien le seul candidat auditionné, il en est lui-même assez gêné.

Pour comprendre cette situation, il faut replonger dans le contexte des Trente Glorieuses. Chenon est entré au Cnam à un moment de très forte croissance du nombre d'auditeurs au Cnam, le domaine des mathématiques n'échappe pas à la règle. Les connaissances en mathématiques, qu'elles soient “de base” ou plus évoluées en statistiques, mathématiques appliquées par exemple, deviennent importantes dans un nombre croissant de secteurs d'activités. Dans les années 1960-1970, ce seront plusieurs milliers d'auditeurs qu'il faudra former : pratiquement 3000 auditeurs en première année et 500 en seconde année, en 1961, année d'arrivée de Chenon ; ils seront 2800 en première année et plus de 800 en seconde année en 1978, à la veille de la retraite de Chenon.

Ceci explique l'importance et la multiplication des chaires de mathématiques dans cette période (la seconde chaire de mathématiques, celle attribuée à Jaffard, a été créée en 1961), et la pesante charge d'enseignement et d'administration pour faire face à ces cohortes d'auditeurs, incluant les relations avec les centres du Cnam en région.

Le Cnam attire nombre d'auditeurs, mais dans le même temps effraie les candidats à la succession de Jaffard : la charge administrative qui est attachée à la chaire est dissuasive. Second point qui est souligné dans les tentatives pour aller chercher des candidats, le Cnam est structurellement peu adapté pour accueillir un chercheur et enseignant en mathématiques. Son horizon serait trop limité et ne permettrait pas à un chercheur de s'accomplir et d'exposer des théories récentes ou ses propres recherches comme peut le faire un Professeur de Faculté dans des cours de 3ème cycle.

L'avis de la commission des Titres et travaux du 3 novembre 1966 (rapporté par Jaffard) donne en filigrane de très bons indices de la place de Chenon au Cnam. Il lui est reconnu que la guerre a perturbé sa carrière, ne facilitant pas son accès au domaine de la recherche quand il était jeune ; il est également reconnu qu'il a choisi un domaine ardu de la physique théorique pour ce temps de pratique de la recherche, épisode qui s'est conclu par des résultats partiels. En d'autres termes, il a des circonstances atténuantes au plan de ses travaux de recherche...largement contre-balancés par son activité pédagogique, qui a "impressionné" la commission.

Personne ne doute de son dévouement, de son activité auprès des auditeurs, de ses compétences pédagogiques. Il faut enfin souligner que Chenon est particulièrement apprécié d'A. Hocquenghem ce qui lui assure un soutien décisif. Il emporte les faveurs de la commission, à l'unanimité (suivi d'un vote de 46 voix sur 47 au Conseil d'administration), grâce à ses nombreuses qualités et un exposé jugé brillant. René Chenon est titularisé Professeur titulaire de la Chaire de "Mathématiques appliquées aux arts et métiers" en 1967 en remplacement de Paul Jaffard. Il est alors âgé de 55 ans, il faut le souligner, c'est-à-dire en dernière partie de sa carrière ; il prend sa retraite en mars 1980.

Dans le contexte des Trente Glorieuses, Chenon apparaît en quelque sorte comme l'homme de la situation pour former massivement aux mathématiques. Et cela va de paire avec l'abandon de ses éventuelles ambitions en matière de recherche. Durant ces 13 années Chenon est un "bon soldat" de l'enseignement, accomplissant les missions du Cnam sans faille. Il prend une place certes mineure par rapport au principal leader des mathématiques au Cnam, A. Hocquenghem, il reste le troisième nom (après ceux d'Hocquenghem et Jaffard) sur les ouvrages et fascicules de cours et exercices produits à cette époque pour l'enseignement des mathématiques. Chenon participe néanmoins très activement à l'enseignement, à son évolution également, en fonction des besoins qui se manifestent au Cnam et à l'extérieur.

En un sens, les talents d'un mathématicien de niveau international ne sont pas nécessaires au Cnam pour les enseignements dispensés par Chenon, ce sont les qualités pédagogiques qui priment. Chenon décrit lui-même les qualités premières des contenus de mathématiques de ces cours pour auditeurs du Cnam : les cours "doivent être conçus pour répondre le plus exactement possible aux besoins en mathématiques des autres enseignements, ils doivent être donnés le plus simplement et le plus brièvement possible et cependant ils doivent rester structurés, formateurs, et ne pas se réduire à l'énoncé de recettes diverses toujours bien peu efficaces quand le fonctionnement des outils mathématiques n'a pas été assimilé."

Chenon participe aux missions du Cnam, qui se prolongent à travers l'épisode des cours du Cnam à la télévision. Après les débuts de retransmissions de cours dans un nombre restreint de centres d'enseignement, le groupe TéléCnam ouvre son auditoire très largement : à partir de novembre 1966 l'ORTF programme ses cours sur la seconde chaîne. Les cours de mathématiques générales font partie des tous premiers programmes. A. Hocquenghem assure les premiers cours magistraux, assisté par Chenon chargé des corrections d'exercices. Ces cours sont d'ailleurs repris du manuel de mathématiques Hocquenghem-Jaffard. Par la suite, Chenon sera chargé d'un enseignement complet, d'une heure hebdomadaire, d'"Initiation aux

mathématiques modernes”. Ces émissions visent un public large, néanmoins familier du type de cours proposé par le Cnam. L’ambition n’est pas de former des débutants, mais de proposer des perfectionnements à des auditeurs souhaitant se familiariser avec le vocabulaire et les concepts des mathématiques modernes. Nous sommes tout à fait dans le prolongement des missions et des enseignements donnés dans les locaux de la rue Saint Martin. On soulignera cependant les tentatives d’adapter la pédagogie du cours magistral pour le format télévisuel, en agrémentant la fin des leçons par des discussions, des échanges de type question-réponse entre le professeur et un auditeur, manière de rendre plus vivante une séquence cadrant essentiellement un tableau noir.

À sa retraite en 1980, la mission de Chenon au Cnam est accomplie. Il a été un fidèle personnel du Cnam, sans faille, un serviteur de l’enseignement, qui a participé au rayonnement du Cnam à sa manière, modestement, dans l’ombre de la figure d’A. Hocquenghem.

Annexe – Notice « Infra-red spectroscopy »

A paraître : Petitgirard, Loïc, 2019, « Infrared Spectroscopy » dans *Tools in Materials Research*, Cyrus Mody, Joseph D. Martin (eds.), Encyclopedia of the Development and History of Materials Science, World Scientific

Infrared Spectroscopy

Loïc Petitgirard

Infrared spectroscopy became a widespread tool for investigating materials because an infrared spectrum offers kind of a material fingerprint, revealing qualitative and quantitative information about a substance's structure and components. The absorption of a specific infrared frequency by a molecule corresponds to what is called a “vibrational mode”, a regular, quantized molecular oscillation. Understanding the vibrational modes of a material sample reveals, among other things, the bond structure of the molecules within it. Infrared spectroscopy can thereby help identify the components that make up a material and their relative abundance in a sample. The size of the absorption peaks in the spectrum gives an indication of the amount of a component in a given mixture. Almost every type of sample (liquids, powders, films, surfaces, gases, and so on) can be analysed using IR spectroscopy.

The development of infrared spectroscopy through the twentieth century was nonlinear. Some principles, such as interferometry for spectroscopy in the IR, were forgotten for some time before being (re)discovered and developed after 1950. The field was characterized for a long time by competition between technologies, before it was transformed by the advent of digital computers.⁽⁵⁾

The first infrared spectrometers were dispersive instruments. Infrared frequencies were separated by a prism, much the same as with visible light, and later by diffraction gratings, which better separate the frequencies.⁽⁵⁾ The detectors in those instruments measured the energy passing through the sample for each frequency, rendering its spectrum as a plot of each measured intensity/frequency. Until the 1960s, these instruments were the only tools for rendering spectra from the near-infrared (close to the visible, wavelengths from 0.8 to 2 μm , corresponding to vibrations of molecules) to the far-infrared (25 to 1000 μm , revealing the properties of metals, semiconductors, and other solids).

These early instruments were nevertheless slow, mechanically complex, fragile and clumsy to handle, and had poor sensitivity when compared with later tools. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), conceived around 1950 and developed over the course of fifteen years, considerably improved performance in all these areas. FTIR was first applied to far-IR spectroscopy, then demonstrated in the near-IR. Since the 1970s it has been the essential tool for investigating mid-IR spectra (2.5 to 25 μm).

Thirty years after this pioneering period, FTIR has become a “black box” instrument, making it an efficient analytical instrument for material research as well as a quality control tool in industry.(5,10) FTIR techniques allow investigation of chemical components and structures, biological materials (cells, bacteria), impurities in materials, and various physical properties such as thickness (important in the semiconductor industry for wafer control, for example), crystallinity, phase changes, and other phenomena. It remains among the most widely used and popular analytic techniques. The following recounts the development of FTIR in the second half of the twentieth century, but it also touches upon some other dispersive techniques, which developed in parallel and remained in use for niche applications in the far or near-infrared ranges.

1950–1965 Birth of FTIR

The idea of using an interferometer for spectroscopy, replacing a dispersive prism, was suggested and tested early in the twentieth century by Albert Michelson, Heinrich Rubens, and Herbert Hollnagel.(5)

Interferometry

An interferometer is made of a beam splitter, BS, and two mirrors (a fixed one, M1, and a moving one, M2) in a precise configuration (see figure 1). A light beam enters the interferometer, is divided in two parts by the beam splitter. After reflecting off the respective mirrors, the two beams are recombined. Their path difference can be discerned by analysing the constructive or destructive interference produced by interfering the beams. Interferometers output light beams with a set of intricate wavelengths, modulated by the moving mirror. Each path difference renders different interference fringes, and thus produces an output beam with a specific set of wavelengths, whereas prisms and gratings select one specific wavelength at a time.

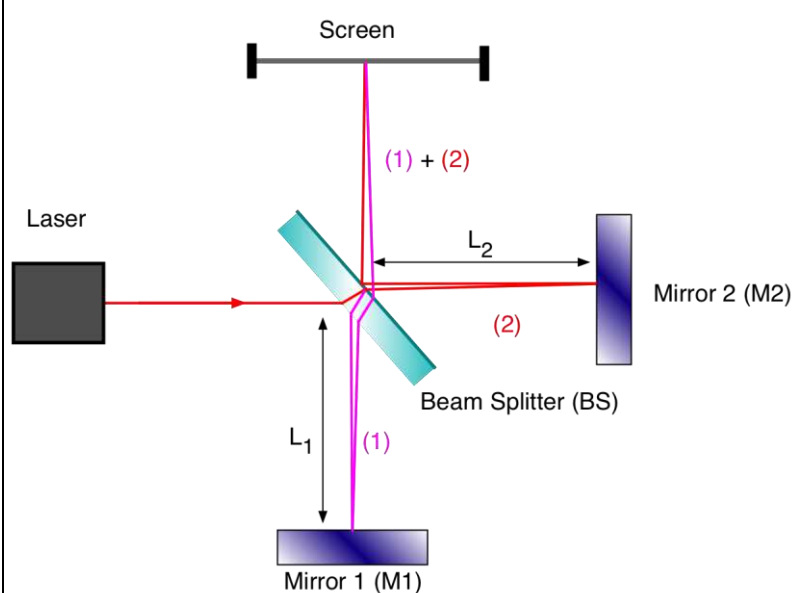


Fig. 1. The basic principle of the interferometer. Source: Wikimedia commons

But the relationship between the resulting interferograms and the spectrum was misunderstood.

On the one hand, Michelson explained and emphasized the importance of interferometers for spectroscopic measurement, through his own experiments (mainly with visible light). But, on the other hand, he used his eye as detector and could then only measure light contrasts, and not absolute intensities of light.

The complete spectrum an interferometer provides can be only determined with knowledge of the intensities of the fringes, obtained through the progressive increase of the path difference in the interferometer. Recording contrasts, Michelson could only get a partial interferogram, not a proper complete one. From 1910 onward, Rubens introduced the thermocouple as a detector, allowing him to measure complete interferograms. But they were not yet understood as Fourier transforms of the spectrum. Only Hollnagel, a student of Rubens, realized this. He published in his PhD thesis on the topic in 1920, but subsequently disappeared from the scene—Rubens also moved to other instrument developments.(2,5)

A complete analysis of the technique's advantages and a path to a true FTIR spectroscope would have to wait until 1948–1950 and the work of two physicists and spectroscopists: Peter Fellgett and Pierre Jacquinot.(2,5) In his Cambridge University PhD thesis, Fellgett pointed out the wasted radiation in dispersive system: prisms and slits, as selecting device for wavelengths, lowered resolution and slowed measurements. He looked for a system to measure all frequencies simultaneously and found in the Michelson interferometer a proper instrument to produce such a “multiplex.”(3) Simultaneous measurement of different frequency ranges gave an advantage in signal-to-noise ratio, but the resulting signal, the interferogram, “encoded” the spectrum: the interferogram, in other words, is the Fourier transform of the spectrum. By 1950, Fellgett had rendered his first primitive spectra (with manual calculations) and the multiplex aspect of the system was subsequently called the “Fellgett advantage.”

Fourier Transform

A Fourier transform is a mathematical transformation of a function f (mathematical function or derived from a signal) into another function $F = FT(f)$ that corresponds to the spectrum of the frequencies or wavelengths contained in the initial function. Both functions ($f(x)$ and $F(v)$) contain the same information but represented in two different manners (spatial or spectral domains). In FTIR spectroscopy the interferogram (output signal produced with the interferometer) is Fourier-transformed into the spectrum (intensity versus frequency).

Pierre Jacquinot independently experimented with spectroscopes and looked into the luminosity of instruments.(4) He showed that interferometers, compared with dispersive instruments, did not so strictly limit the amount of radiation passing through them. Interferometers had larger optical apertures, providing a “throughput advantage” (later called “Jacquinot advantage”). The advantages stemming from the work of each of these physicists flowed from reasoning about the physical characteristics of the instruments, applying lessons from quantum theory to (low light level) spectrometry.

A small community of instrumentalists, motivated by these theoretical advantages, came together to foster research and development of the technique.⁽⁹⁾ H. Alistair Gebbie and George A. Vanasse produced the first complete spectra (more extensive than the first Fellgett's spectrum) using an IBM 650 computer in 1956. Janine Connes wrote the most complete theory of the FTIR instruments of her time in her PhD thesis in 1960, which covered methods for sampling the interferogram, improving signal-to-noise ratio, and calculating the Fourier transform. Her thesis was conducted at Bellevue (France), with Jacquinot as supervisor. Physicists, especially spectroscopists, were the key players at that time because these instruments were high precision spectroscopy, in low optical infrared radiation (and first in the far-infrared domain). They were designed from scratch with the unique expertise of experimental physicists in a domain of IR where commercial dispersive instruments were impractical (not to say useless).

FTIR development is also the result of a transnational effort, based on a few small groups of physicists: mainly Jacquinot and the Connes in France, Fellgett, and Gebbie in Great Britain, Vanasse and Mertz in the United States. They gathered in dedicated conferences, in search of visibility among the vast community of physicists and legitimacy for their concepts and way to practice their "instrument science."^(3,9)

The "Infracord"

FTIR developed in parallel with dispersive instruments, which could make slow spectrum measurement, which, although less precise, proved faster and more efficient than early FTIR procedures.⁽⁵⁾ High precision interferograms were easy to produce thanks to the instrumentalists' optical expertise, but conveyed no useful information until their Fourier transform was calculated, which could take hours. Although dispersive instruments were often slower to generate spectra, they provided output in a more readily interpreted format.

Introduced in 1957, the Model 137 "Infracord" of Perkin-Elmer epitomizes the dispersive spectrometer of the 1960s.^(5,8) It was a double-beam spectrometer in which two beams from the infrared source are projected on the sample area. Wavelengths (from 2.5 to 15 μm) could be selected sequentially with a rotating mirror and passed through the prism and detector (see figure 2, 3, 4). Gratings would later replace the prism leading to a next-generation line of spectrophotometers. Perkins-Elmer had sold more than 10,000 instruments by the 1980s, benefiting from improvements in electronics and making them a major manufacturer in the domain (they also extended into instruments for UV spectroscopy).

Demonstrating FTIR's Superiority

The team led by Pierre and Janine Connes developed an instrument between 1964 and 1966 that demonstrated the superiority of FTIR to dispersive techniques and gave many scientists the decisive incentive they needed to pursue FT spectroscopy.^(2,5,9) The husband-and-wife team measured and calculated the spectra of Venus and Mars with unprecedented precision, in difficult conditions: taking near-infrared measurements through the atmosphere meant accounting for turbulence, fluctuations, and low-light conditions. They surmounted these challenges and were able to produce high-resolution results and a much better signal to noise ratio than that offered by any other instrument at that time. They ran Fourier transforms on an IBM 7040 mainframe, which took several hours to calculate each spectrum. Although this

technological performance had a high symbolic impact, it nevertheless had no evident commercial applications.

A technical inflection point in the development of FTIR, apart from the optical developments the Connes team pioneered, was the capacity to calculate the Fourier transform of an interferogram faster and more completely. Until the advent of the Fast-Fourier Transform (FFT) algorithm, calculation was a chronophagous and expensive task, consuming costly hours on mainframe computers.⁽⁵⁾ From 1966 on, the Cooley-Tukey algorithm for FFT, named for the mathematicians James Cooley and John Tukey, reduced calculation times from hours to minutes, and then to seconds. This was decisive. Hardware progress combined with software development made FTIR accessible outside specialized physics laboratories. The microprocessor, invented in the 1970s, was then used to control the instrument and made it easy to use. In the 1980s, FTIR spectrometers became powerful, cheap, reliable, and automated.

Commercial Development of FTIR

The first commercial FTIR spectrometers were produced in the 1960s. As lab experiments, FTIR spectrometers had begun, like most similar instruments, as custom-made devices. The first complete commercial system was FTS-14, manufactured by Digilab in 1969 (see figures 5 and 6). It incorporated the heritage of this pioneering period alongside a number of new ideas, many of them promoted by Lawrence Mertz (then at Block engineering, which would become Digilab).^(7,8) In the FTS-14, as in many infrared spectrometers, the light beam was modulated: the displacement of the moving mirror (with constant speed) of the interferometer, allowing both what became known as fast-scanning technology for FTIR and repeated scanning to improve signal-to-noise ratio. The FTS-14 also included a computing facility and plotting device, a laser reference system for internal calibration (inherited from the Connes's instruments). Beamsplitters, sources, and detectors were devised to explore a large range of wavelengths. Altogether, the FTS-14 set the basis for commercial FTIR spectrometers for the years to come because it encompassed all the advantage drawn from research in FTIR: easy to use, fast results, precision and even more user-friendly experience than dispersive techniques (that always required delicate manipulations).

Digilab turned out to be a leader as a manufacturer and it was acquired by Bio-Rad Laboratories in 1978: from a specialized manufacturer, it became part of a much larger catalogue of instruments, with clients in always wider domains. That is also a factor in the expansion of a mature technology outside the range of its first developments.

FTIR expands its Uses

Starting in the hands of physicists, FTIR spectroscopy has been progressively adopted by chemists and industry at large.^(1,2,5) On the one hand, such instruments were increasingly accessible and efficient. On the other hand, demands for IR spectroscopy rose in the 1970s coming from diverse horizons.⁽¹⁾ FTIR could answer question from basic research in atomic and molecular physics and chemistry (producing data on wavelength molecular absorption) to astronomy (from planet spectra to deep space measurements). In solid-state studies, applications were numerous: superconductor energy-gap measurements, infrared detector and source-development projects, infrared filter development, and metallic surface property studies, to name a few. FTIR could also characterize compounds: corroded surfaces, paintings, oils and pigments on paper, optical opaque substances. The largest commercial applications were

process and quality control: monitoring multicomponent mixtures, with high-speed results, meant a quick retroaction on production lines.⁽¹⁾ As spectra were becoming routine measurements, quality control was easier, detecting even low concentrations of impurities and additives for chemical, plastics, coatings, petroleum and pharmaceutical industries.

Altogether FTIR offered non-destructive analysis, as well as easy and fast data collection on the order of a second per scan. FTIR allowed high-precision measurements without any complex manipulation for calibration of the instrument (it is self-calibrating thanks to the embedded laser beam reference passing through the interferometer), with high optical throughput. The device is mechanically simple with a single moving part: the mobile mirror for scanning.

A series of technical innovations and improvements made FTIR progressively faster and more accurate in the 1980s and afterwards. Different materials for the beam splitters in the interferometer and detectors (pyroelectric, or photovoltaic) have made it possible to investigate a range of wavelengths from 1 to 1000 μm . Sampling techniques also improved: specialized sampling procedures such as attenuated total reflectance (ATR), diffuse reflectance (DR), and photoacoustic spectroscopy (PAS) increased efficiency greatly. ATR allows analysis of thick or very absorbent samples, directly in their liquid or solid state. As DR it is based on reflectance analysis of IR in the sample, not the transmission through the sample. That means a different (but easy) preparation of samples for FTIR. PAS is particularly useful for in situ state analysis of biological samples (without crushing such materials).

The control and complete analysis of the results by microcomputers has made the device user-friendly and rendered its operation routine. From veteran experimenters to inexperienced scientists and technicians, just about anybody can use FTIR.

Legacy of FTIR

In addition to its many industrial and scientific applications, FTIR exerted a lasting influence over materials research by proving the feasibility and utility of Fourier transform spectroscopic techniques. First demonstrated with infrared, these techniques have since combined different technologies and unrelated ideas: among them spectroscopy, interferometry, digital computing, mathematics of Fourier transform and algorithmic for FFT. Since the 1950s, Fourier transform spectroscopy techniques have moved from the specialized domain of the physics laboratory and are now standard diagnostic tools in many branches of science and industry. These techniques have also extended to other domains: Fourier versions of nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy and mass spectroscopy (MS) became reality after 1972 and showed a considerable gain in sensitivity and resolving power.^(2,9) FTIR had paved the way to Fourier techniques in spectroscopy, then pushed the limits of so-called classical instruments, such as spectroscopes and interferometers, and gave birth to major analytical tools.

References

1. Bell RJ. *Introductory Fourier transform spectroscopy*. Academic Press; 1972.
2. Connes P. Early history of Fourier transform spectroscopy. *Infrared Physics*. 1984;24(2):69–93.
3. Fellgett PB. Three concepts make a million points. *Infrared Physics*. 1984;24(2):95–98.

4. Jacquinot P. How the search for a throughput advantage led to Fourier transform spectroscopy. *Infrared Physics*. 1984;24(2):99–101.
5. Johnston SF. *Fourier transform infrared: a constantly evolving technology*. New York: Ellis Horwood; 1992.
6. Kendall DN, editor. *Applied infrared spectroscopy*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1966.
7. Mertz L. A perspective on Fourier spectroscopy. *Infrared Physics*. 1984;24(2):111–12.
8. Griffiths PR. The early days of commercial FT-IR spectrometry: a personal perspective. *Applied Spectroscopy*. 2017;71(3):329–40.
9. Johnston SF. In search of space: Fourier spectroscopy 1950–1970. In: Joerges B, Shinn T, editors. *Instrumentation between science, state and industry*. Dordrecht: Springer; 2001. p. 121–41.
10. Johnston SF. The evolution of FTIR technology. *Chemistry in Britain*. 1990;26:573–77.

Figures

Fig. 2. The Perkin Elmer KBr Model 137 - Infracord Spectrometer

<http://antiquesci.50webs.com/PE337/IJVS6PE-2.htm>



<https://digital.sciencehistory.org/works/2n49t2601>

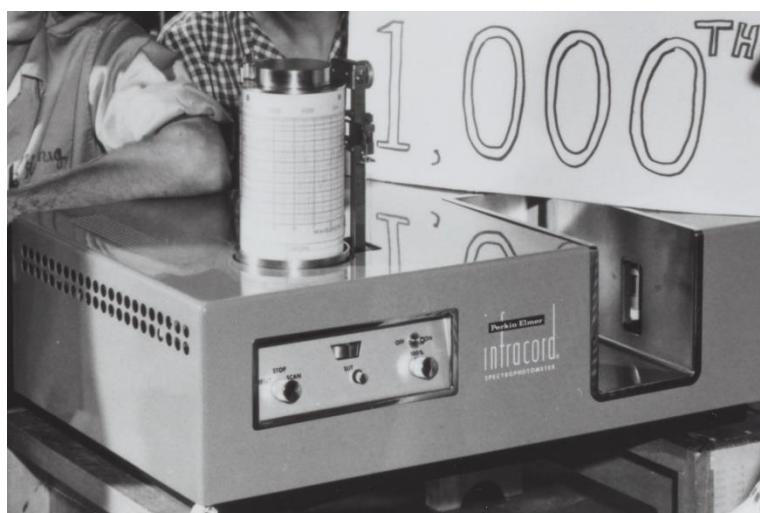
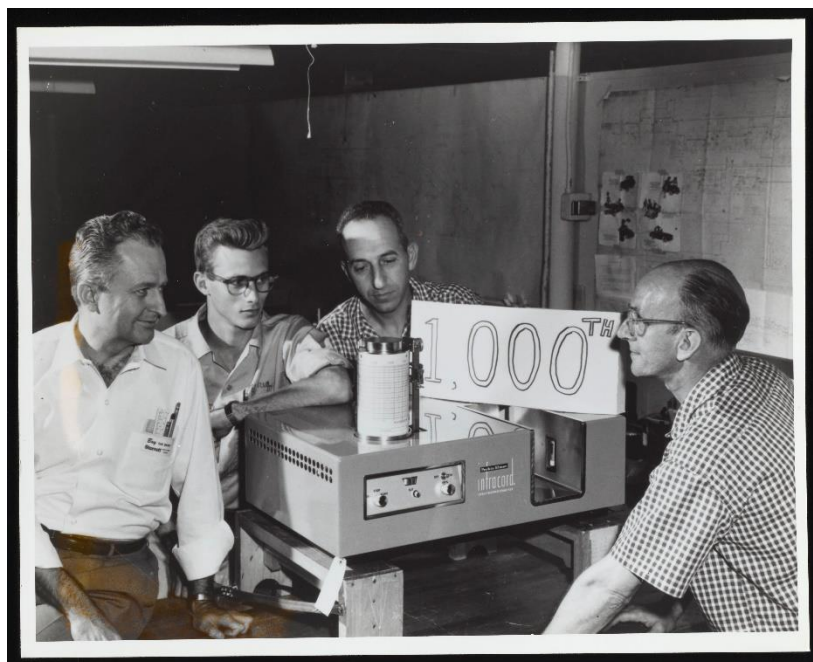


Fig. 3. Spatial Diagram of the Optical System of Perkin-Elmer Model 137

Source: <http://antiquesci.50webs.com/PE337/IJVS6PE-2.htm>

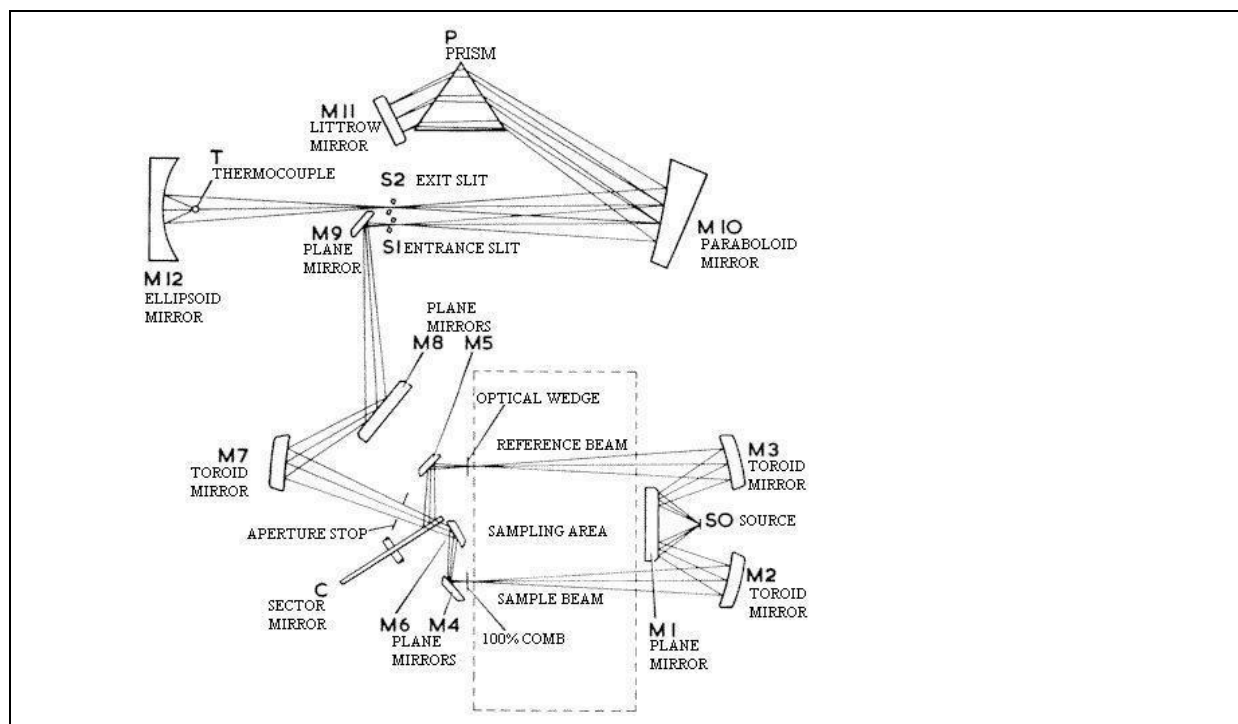


Fig. 4. Polystyrene recorded on the prism PE157.

Source: <http://antiquesci.50webs.com/PE337/IJVS6PE-2.htm>

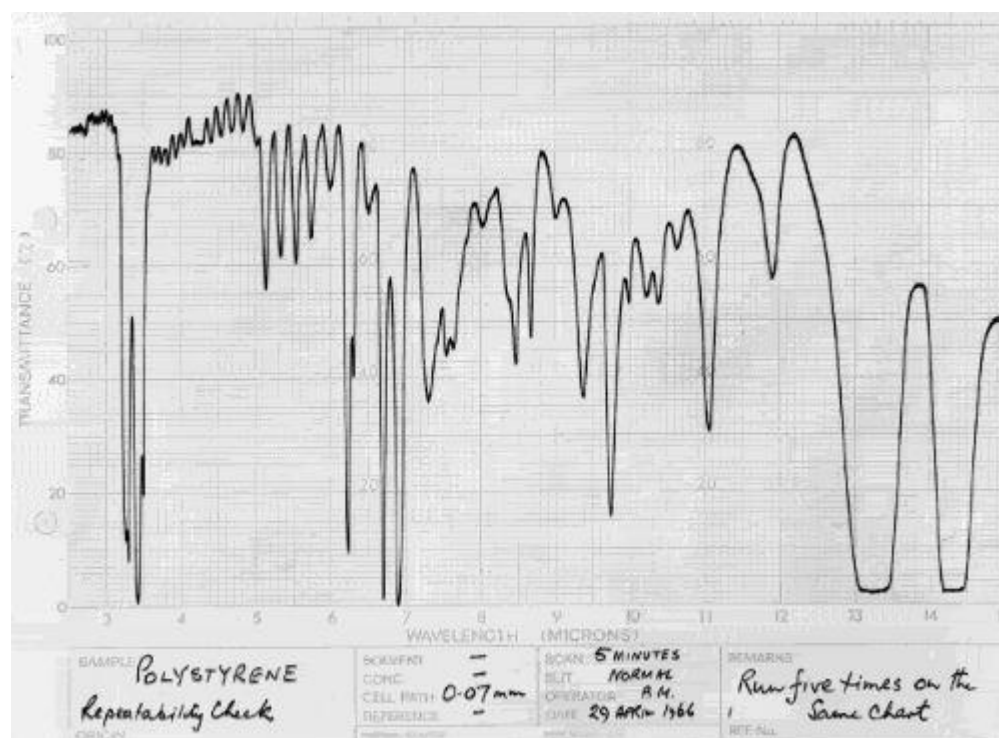


Fig. 5. Digilab FTS-14 – Schematic principle. Source: Griffiths, P.R. (2017). The Early Days of Commercial FT-IR Spectrometry: A Personal Perspective. Applied Spectroscopy 71, 329–340.

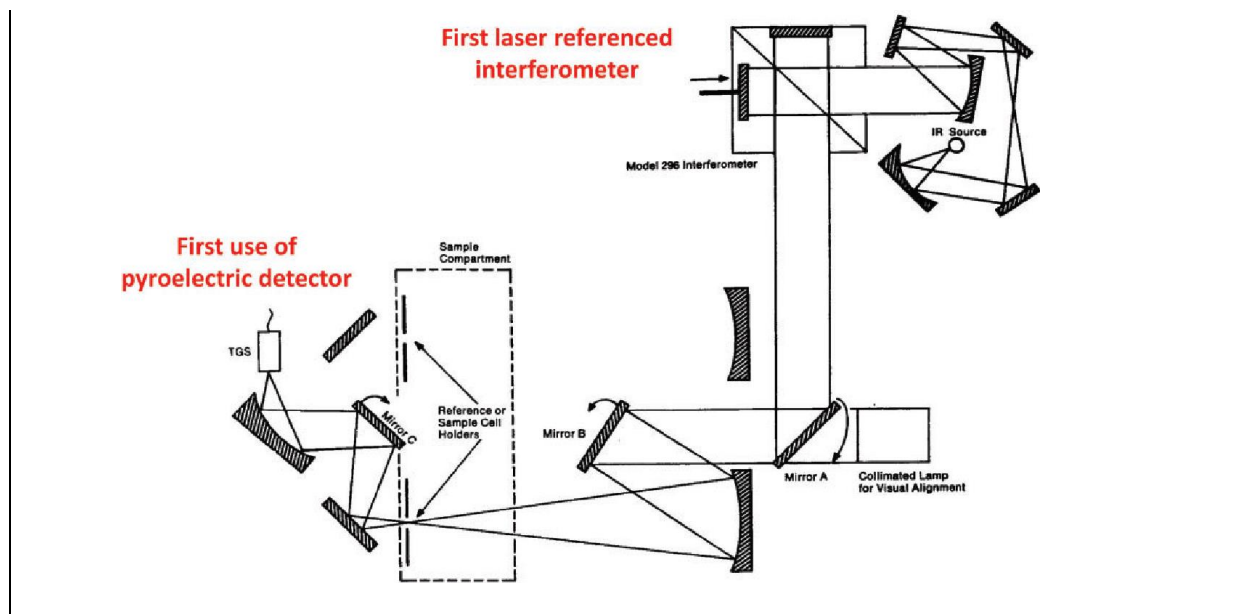
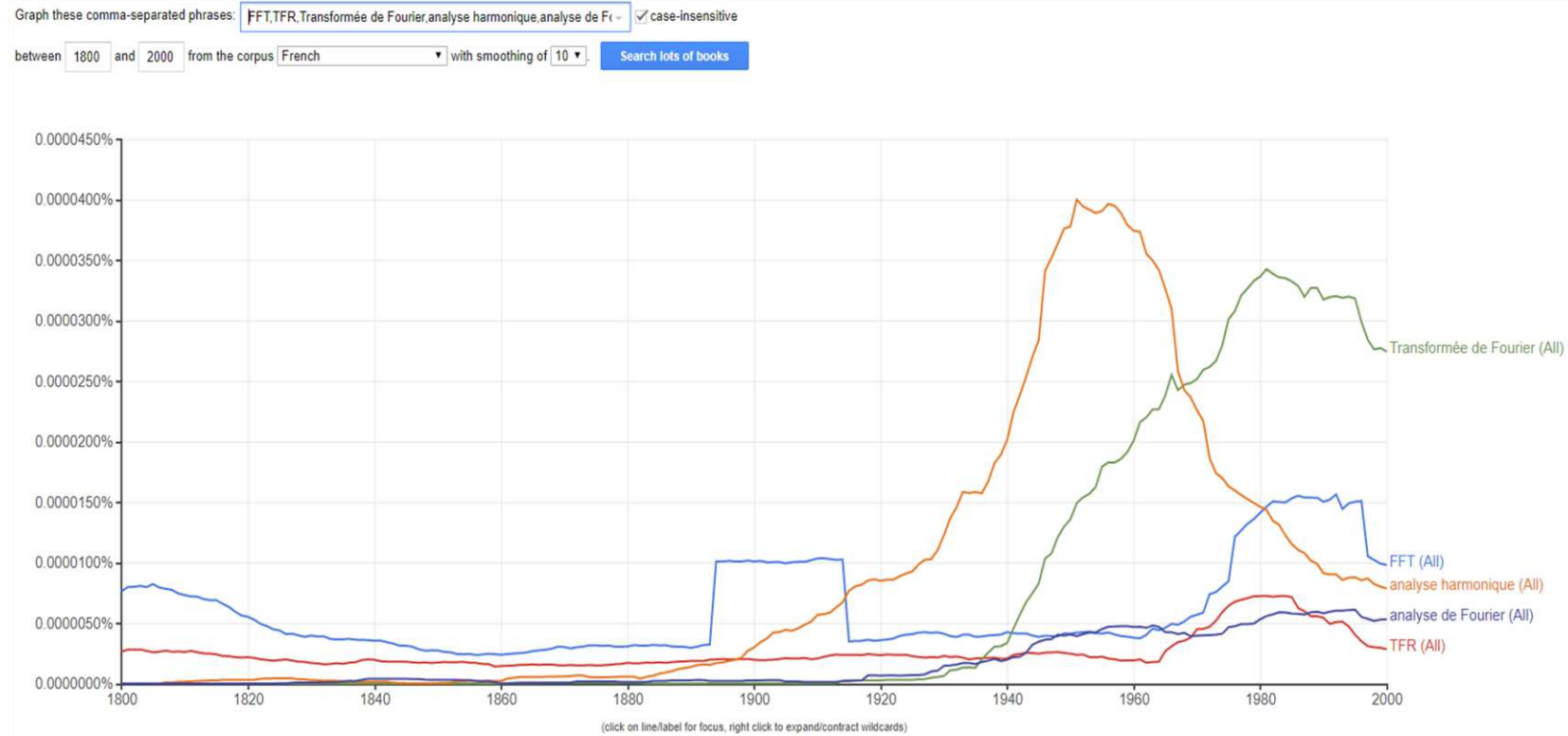


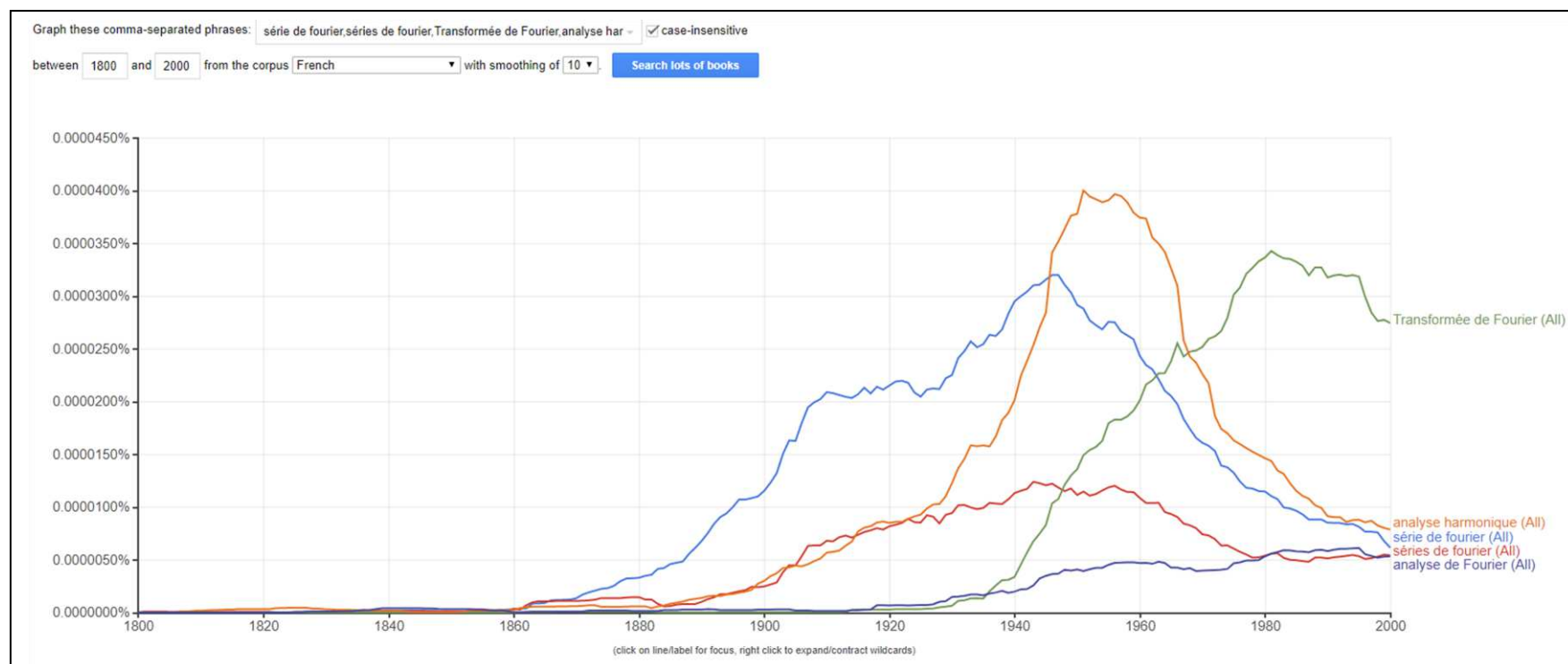
Figure 6 – DIGILAB FTS14 – picture taken in 1972

Source: Griffiths, P.R. (2017). The Early Days of Commercial FT-IR Spectrometry: A Personal Perspective. Applied Spectroscopy 71, 329–340.

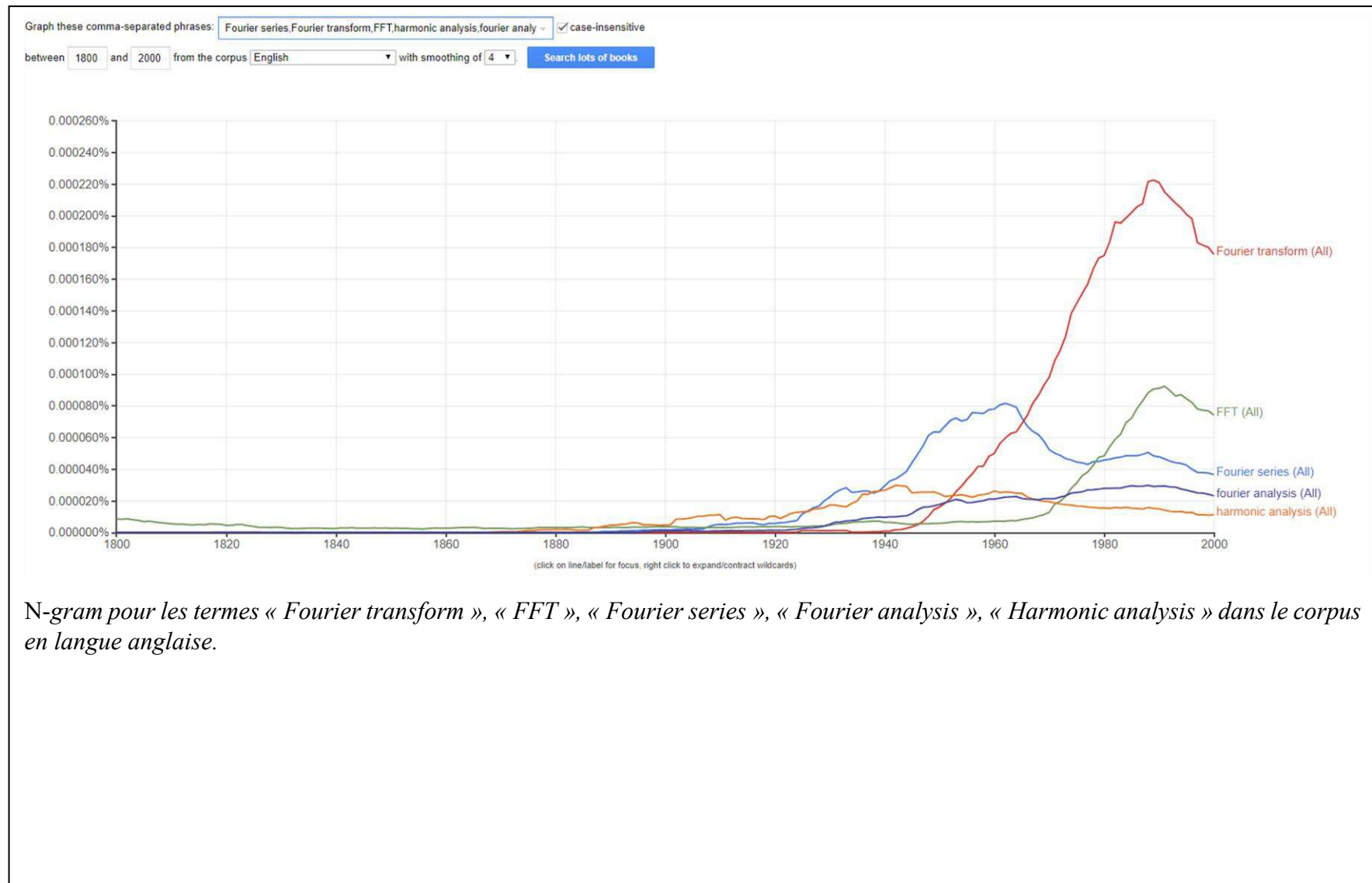


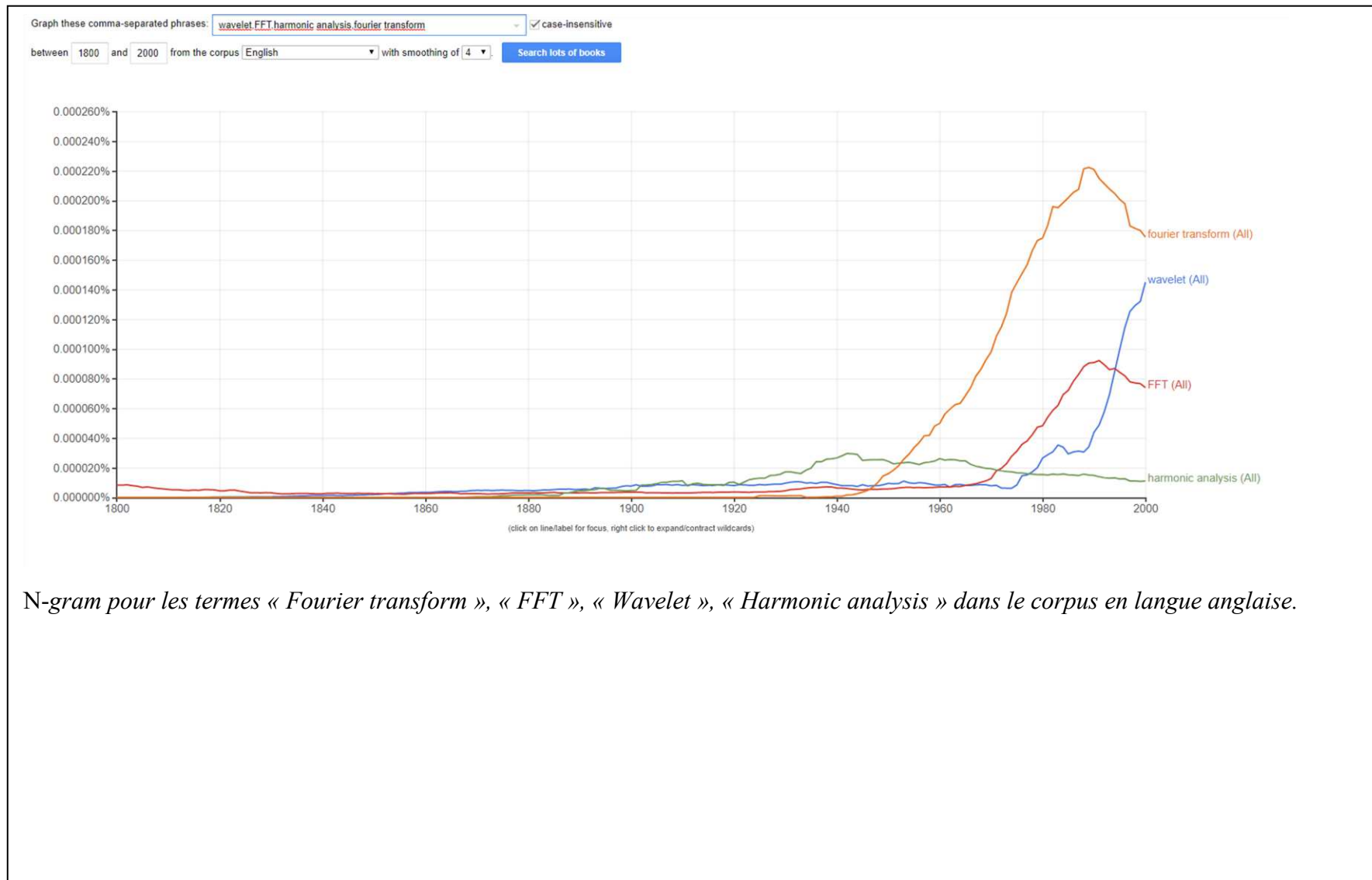


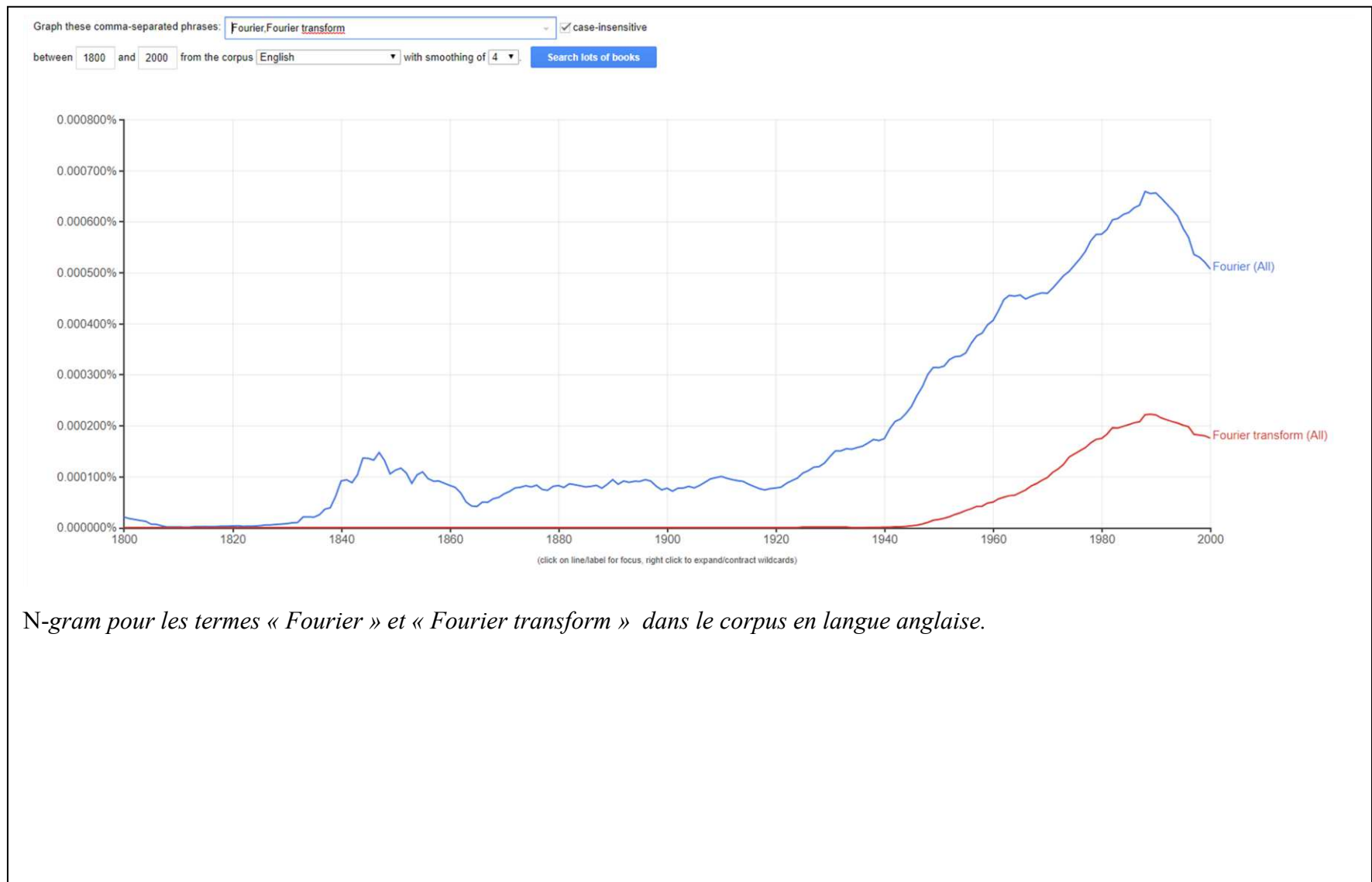
N-gram pour les termes « FFT », « TFR », « Analyse de Fourier », « Transformée de Fourier », « Analyse harmonique » dans le corpus en langue française.

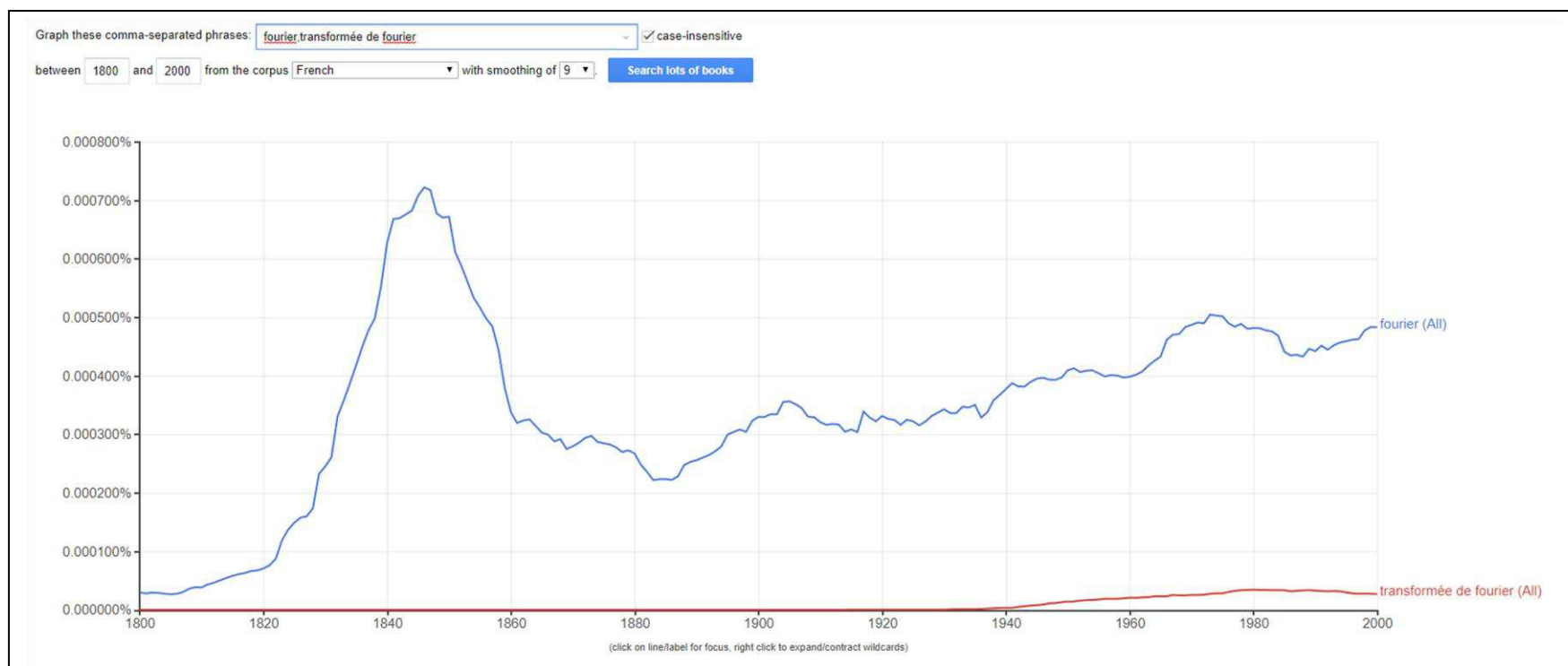


N-gram pour les termes « Transformée de Fourier », « Analyse harmonique », « série de Fourier », « analyse de Fourier » dans le corpus en langue française.









N-gram pour les termes « Fourier » et « Transformée de Fourier » dans le corpus en langue française.