

le **cnam**

Cahiers d'histoire du Cnam

• vol. 3

Dossier

Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses

Coordonné par Loïc Petitgirard

2015 / Premier semestre
(nouvelle série)



Cahiers d'histoire du Cnam

• vol. 3

Dossier

Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses

Coordonné par Loïc Petitgirard

2015 / Premier semestre
(nouvelle série)

Cahiers d'histoire du Cnam. Vol. 3, 2015 / 1 (nouvelle série).

Dossier « **Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses** »,
coordonné par Loïc Petitgirard.

Direction de la publication

Olivier Faron, *administrateur général du Conservatoire national des arts et métiers*

Éditeurs

Claudine Fontanon, André Grelon, Loïc Petitgirard, Jean-Claude Ruano-Borbalan

Comité de rédaction

Soraya Boudia, Jean-Claude Bouly, Serge Chambaud, Renaud d'Enfert, Claudine Fontanon, Virginie Fonteneau, Clotilde Ferroud, André Grelon, Loïc Petitgirard, Laurent Rollet, Jean-Claude Ruano-Borbalan

Comité de lecture

Soraya Boudia, Hélène Gispert, André Grelon, Camille Jutant, Philippe Destuynder, Laurent Rollet, Martina Schiavon, Elsa Vivant

Secrétariat de rédaction

Camille Paloque-Berges, assistée de **Sofia Foughali**

Laboratoire HT2S-Cnam, Case 1LAB10,

2 rue Conté, 75003 Paris

Téléphone: 0033 (0)1 40 27 22 74

Mél: camille.paloque_berges@cnam.fr

sofia.foughali_sadji@cnam.fr

Maquettage

Françoise Derenne, *sur un gabarit original créé par la Direction de la Communication du Cnam*

Impression

Service de la reprographie du Cnam

Crédits, mentions juridiques et dépôt légal:

©Cnam

ISSN 1240-2745

Illustrations photographiques:

Archives du Cnam ou tous droits réservés

Fondateurs (première série, 1992)

Claudine Fontanon, André Grelon

Les 5 premiers numéros de l'ancienne série (1992-1996) sont disponibles intégralement sur le site Web du Conservatoire numérique du Cnam: <http://cnum.cnam.fr>

Sommaire

Dossier

Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses	7
Introduction au dossier Loïc Petitgirard	9
« Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale (1795-1960) » Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard	13
« Le Cnam et la restructuration de la Métrologie française dans les années 1960 » Loïc Petitgirard	39
Repères – Enquête d'acteur « L'aventure de la photométrie au Cnam (1970-2005) » Jean Bastie et Loïc Petitgirard	75
Repères – Enquête d'acteur « Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam, depuis 1967 » Michel Lecollinet	109
Entretien avec André Allisy Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard	129
Varia	141
« Qui est le public du Musée des arts et métiers ? Une analyse de la visite muséale comme bien d'expérience » Rebecca Amsellem	143
Paroles de professionnels « La mission nationale Patrimoine scientifique et technique contemporain au muséum Henri-Lecoq (PATSTEC Auvergne) » Nathalie Vidal, Mickaël Le Bras, Amandine Schmaltz, Stéphane Nicolas, Aurélia Léchelon et Catherine Cuenca	163



Dossier

Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses

Coordonné par Loïc Petitgirard

Introduction

Loïc Petitgirard
HT2S, Cnam.

Ce dossier est issu d'une séance de séminaire intitulée « La métrologie au Conservatoire national des arts et métiers dans les Trente Glorieuses » et organisée le 17 octobre 2013 par Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard, avec le concours du laboratoire HT2S (Cnam) et du Centre Alexandre Koyré (EHESS/CNRS)¹. Ce séminaire s'inscrit dans une série de rencontres scientifiques interrogeant les évolutions du Cnam dans la période des Trente Glorieuses et son rôle dans les transformations de la vie scientifique, technique et socio-économique française.

Choisir la métrologie comme thématique signifiait revisiter la longue histoire de l'activité métrologique au sein du Cnam, qui remonte aux premières heures du Système métrique. La métrologie se développe aujourd'hui au XXI^e siècle dans le Laboratoire commun de métrologie (LCM), installé dans les locaux du Cnam à Saint-Denis, et inséré dans un dispositif qui coordonne l'ensemble des acteurs de la métrologie. Mais la coordination effective, nationale, de l'activité de métrologie, qui permet d'élaborer des références et

étalons nationaux pour les grandeurs fondamentales (longueur, masse, intensité du courant électrique, température, etc.) et leur diffusion dans le système technique, date seulement des années 1960. La mise en place de cette structure a représenté un temps fort de l'histoire de l'organisation métrologique nationale.

La rencontre de 2013 avait été motivée par l'état historiographique relativement lacunaire sur le sujet et développait une problématique articulée par deux questions principales. D'une part, les grands pays industrialisés ayant structuré leur métrologie nationale respective vers 1900, pourquoi a-t-il fallu attendre les années 1960 pour coordonner, organiser, restructurer la Métrologie française? Au regard de cette interrogation, et prenant acte des relations particulières tissées avec le Cnam, on s'est demandé quel a été le rôle de l'établissement dans cette restructuration? Dans la continuité des rencontres organisées sur l'histoire du Cnam, la période des Trente Glorieuses avait été privilégiée pour le séminaire. Il est apparu rapidement impératif de déborder cette période, en amont et en aval: d'une part, pour retrouver les racines de cette longue histoire, d'autre part pour analyser les

¹ Dans le cadre des rencontres autour du dictionnaire biographique des professeurs du Cnam.

suites et conséquences de la restructuration, au cours des années 1970-1980.

Pour répondre à cette problématique il était nécessaire de convoquer plusieurs regards, exposés dans les textes qui constituent ce dossier. L'article de Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard, tout d'abord, donne toute son épaisseur historique à la problématique. Il projette les questionnements sur la longue durée, insistant sur les dynamiques créées au XIX^e siècle avec le développement de la métrologie au Cnam. L'article est un éclairage historiographique ponctué par des résultats complémentaires de recherches effectuées depuis avec pour objectif de fixer le contexte préliminaire à la restructuration des années 1960. Il révèle en creux le vaste chantier historiographique sur ce sujet et les nombreuses lacunes, tout particulièrement concernant le Laboratoire national d'essais (qui était un laboratoire du Cnam jusqu'en 1978).

Le deuxième article de Loïc Petitgirard est précisément centré sur le rôle du Cnam dans les années 1960-1970. Fruit d'un ensemble de recherches inédites, mais dans un contexte historique qui a fait l'objet de l'attention de plusieurs historiens, il montre les jeux d'acteurs et d'institutions pris entre la politique scientifique gaullienne, la dynamique de l'établissement, les enjeux de recherche et d'enseignement de la métrologie.

Étant donné le caractère récent des transformations analysées, il est apparu opportun, voire nécessaire, de convoquer

quelques acteurs de cette histoire. Les historiens du contemporain puisent d'ailleurs leurs matériaux dans la variété des archives à disposition, dans la mémoire et les paroles des acteurs qui ont fait l'histoire. Convaincu de la valeur de ces témoignages, en cohérence avec la ligne éditoriale des *CHC*, nous avons invité Jean Bastie et Michel Lecollinet à faire part de leur expérience. Jean Bastie, artisan des travaux de Photométrie au Cnam, fait état de l'activité de l'équipe de Photométrie depuis 1970 et les réalisations de la « candela française ». Michel Lecollinet, qui a enseigné au sein de la Chaire de métrologie, dresse le portrait des enseignements et de leur public depuis la création de la Chaire en 1967.

Enfin, le dossier laisse une place à André Allisy, titulaire de la Chaire de métrologie de 1967 à 1990, directeur de l'Institut national de métrologie du Cnam. Sous forme d'entretien, ce texte donne à voir son parcours et son arrivée au Cnam, avant qu'il ne devienne le catalyseur du renouvellement de la métrologie scientifique au Cnam.

En définitive, le dossier dresse un panorama, certainement pas exhaustif, mais représentatif de l'étendue de l'activité métrologique au Cnam et ses implications dans l'histoire française de la Métrologie. Il donne à voir les succès, les difficultés, les obstacles dans l'organisation de la métrologie à différentes échelles, depuis la création de la Chaire de métrologie du Cnam et du Bureau national de métrologie, jusqu'à la fin du XX^e siècle.

Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale (1795–1960)

Claudine Fontanon

Centre Alexandre Koyré, EHESS et HT2S, Cnam.

Loïc Petitgirard

HT2S, Cnam.

Résumé

Au fil du XIX^e siècle, le Conservatoire est devenu un des lieux techniques assurant la diffusion du Système métrique. Il prend une place centrale dans le dispositif national de métrologie, aboutissant à la création du Laboratoire d'essais en 1900. L'article vise à caractériser les trois phases de cette dynamique : entre 1795 et 1848, le Conservatoire accompagne le Système métrique ; de 1848 à 1900, l'action d'Arthur Morin propulse le Conservatoire comme acteur technique majeur de la Métrologie française et internationale ; après 1900, on montre la perte de leadership, les divergences et crises qui marquent l'institution, avant l'orchestration de la restructuration de la Métrologie nationale dans les années 1960.

Introduction

Les relations entre le Cnam et la Métrologie nationale se sont construites au cours du XIX^e siècle, en plusieurs étapes et aboutissements. Soulignons que le terme « métrologie » recouvre progressivement au XIX^e siècle celui de « Poids et Mesures », qui englobe la conservation et le développement des références pour les longueurs, les masses, etc. Selon les périodes nous emploierons alternativement l'un ou l'autre terme. Nous allons montrer qu'au fil du XIX^e siècle, le Conservatoire est devenu un lieu technique majeur dans le projet d'élaboration et d'extension du Système métrique, qui le conduit au centre du dispositif métrologique national. Mais passé 1900, plusieurs acteurs prennent leur marque et responsabilité en métrologie : le Laboratoire central d'électricité (dès sa création en 1880), l'Observatoire de Paris (pour les références de temps), le

CEA pour les questions de mesures en radioactivité après 1945. Ces négociations ont pour toile de fond le développement du BIPM (Bureau international des poids et mesures) assurant la coordination des références métrologiques à l'échelle internationale, et situé lui aussi sur le territoire français, à Sèvres. Au fil des répartitions des missions métrologiques se pose plusieurs fois la question de la réorganisation possible de la Métrologie nationale, dans un système centralisé et intégré, qui doit composer avec un Cnam toujours central. Mais rien ne s'engage véritablement dans ce sens avant le tournant des années 1960.

Nous allons voir que cet héritage est constitué d'une histoire d'acteurs, de normes, d'institutions, qui remontent aux temps de la Révolution française et de l'industrialisation de la France. L'héritage est un tissu de relations construites sur cette longue période entre État, industrie, militaires, savants et ingénieurs. Ce réseau trouve des homologues dans d'autres pays mais dans lesquels les relations se sont institutionnalisées selon d'autres modalités, d'autres chronologies. La Grande-Bretagne, l'Allemagne et les États-Unis sont les trois points de références qui sont convoqués dans les projets des années 1960 : nous porterons la comparaison au XIX^e siècle concernant le domaine des « Poids et Mesures ».

L'héritage c'est aussi une dépendance à la précision. La montée en puissance de la science, la technique et l'industrie, d'une part, et de la centrali-

sation des états d'autre part, sont les deux motivations, concomitantes, qui génèrent un besoin croissant de quantification, d'étalons et de précision. La précision va de pair avec la construction d'instruments, d'accords (entre personnes, entre institutions), de normalisation (selon des normes édictées par des états ou institutions) et de standardisation de produits manufacturés. Les grands établissements en charge de ces questions sont construits à la fin du XIX^e siècle dans tous les pays industrialisés. D'une certaine manière, en France, c'est le Cnam qui a été positionné pour cette responsabilité au fil du XIX^e siècle.

Cette histoire est dense, longue, indispensable pour éclairer ce qui se joue dans les années 1960, au milieu des Trente Glorieuses. Pour comprendre cet héritage, nous allons en donner les lignes de force, en prenant le Cnam comme point focal et comme prisme. En nous appuyant à la fois sur l'historiographie existante et sur les archives de l'institution, nous proposons une histoire de ces relations à la métrologie en trois périodes, articulée par deux dates essentielles dans l'institution : 1848, qui marque le transfert du Bureau des poids et mesures du ministère du Commerce vers le Conservatoire ; et 1900, qui correspond à la création du Laboratoire national d'essais (LNE) intégré au Conservatoire (qui devient Conservatoire « national » des arts et métiers dans ce moment de restructuration de l'établissement). À chacune de ces périodes nous rapporterons les évolutions

des missions métrologiques confiées au Cnam, au contexte et enjeux à l'échelle nationale et internationale, sur le terrain économique, politique, institutionnel et industriel.

Dans la première période, de 1790 à 1848, nous verrons que le Conservatoire est un participant parmi d'autres au développement du Système métrique, jusqu'à l'établissement du Bureau des poids et mesures au Conservatoire. De 1848 à 1900, le Conservatoire prend en charge la diffusion du système, réalise des travaux sous la houlette de Tresca et Morin. Le Conservatoire est acteur, voire pilote, de la métrologie à l'échelle nationale et internationale, avec un enjeu de prestige autant que de développement économique et industriel. La création du Laboratoire d'essais, qui prend en charge les questions de contrôles, d'essais et de métrologie, ouvre la troisième période : de 1901 aux années 1960, c'est une période marquée par les turbulences et des crises récurrentes, avec pour problématique essentielle, celle de la mise en place d'un organisme central, national, pour la métrologie et les essais. Nous concluons sur l'état des relations entre la Métrologie nationale et le Cnam, à l'aube des restructurations des années gaulliennes (qui font l'objet du texte de Loïc Petitgirard dans le présent dossier).

Première période – 1790-1848 : accompagner le Système métrique

Le Conservatoire des arts et métiers et le Système métrique sont créés par décrets de l'an III¹. Pour caractériser le rôle du Conservatoire sur cette période, et saisir la responsabilité qu'il endosse à partir de 1848, il est nécessaire de préciser le contexte dans son ensemble, et de revenir aux racines du Système métrique. Car au-delà de la conjonction de dates de création, il existe des déterminants communs à ses créations dans la phase révolutionnaire, qui orientent les développements consécutifs de ces relations.

Qu'est-ce que le Système métrique ?

En se référant aux textes de loi successifs des années 1790, le Système métrique instaure un nouvel ensemble de « Poids et Mesures », un système d'unités, décimalisé, uniformisé, cohérent, à base scientifique : le mètre comme référence pour les longueurs, le kilogramme pour la masse, le Franc pour la monnaie, etc. Une autorité administrative, l'Agence temporaire des Poids et Mesures accompagne ce proces-

¹ Le Conservatoire des arts et métiers est créé le 10 octobre 1794 (19 Vendémiaire, an III). Le 7 avril 1795 (18 Germinal, an III) la Convention adopte le Système métrique.

sus de transformation² pour une courte période (Legendre, 1795; Prieur, 1795), et cette fonction sera transférée à différents bureaux des ministères successifs s'occupant des travaux publics (Garnier, 1990; Marquet, 1997).

Selon Ken Alder, dans les esprits et dans la réalité, les enjeux liés à la mise en œuvre du Système métrique sont complexes, autant scientifiques, qu'économiques, politiques et philosophiques (Alder, 1995). Le Système métrique n'est pas seulement un projet d'uniformisation des étalons de mesure, qui étaient jusque-là très éclatés, incohérents à l'échelle du territoire français et dont la définition était laissée à des pouvoirs locaux. Il est la première occurrence d'un processus de normalisation à grande échelle dans les sociétés modernes. La norme est fixée par les savants, transformée en lois par et pour un état, et son système bureaucratique: c'est cette conjonction qui sous-tend la standardisation qui se généralisera aux pays industrialisés aux XIX^e et XX^e siècles. Auparavant, les communautés locales veillaient sur leurs étalons, leurs standards, pour préserver leur économie locale de la compétition³.

² L'Agence temporaire est créée le 11 avril 1795, avec plusieurs commissaires aux travaux, dont Vandermonde. Pour les détails de cette mise en œuvre administrative, voir (Marquet, 1997), (Alder, 2005, pp. 247-248).

³ Précisons, en outre, qu'il y a une grande latitude entre le système proposé et les demandes formulées dans les Cahiers de doléances (ce sont les registres, tenus dans l'Ancien Régime, renseignant les vœux et doléances des assemblées en charge d'élire les députés aux États généraux). Parmi les doléances, celle de l'uniformisation

Dans une perspective économique et politique, c'est un projet d'une élite parvenue au pouvoir à la faveur de la Révolution française, pour renverser le modèle économique de l'Ancien Régime et instaurer une économie de marché. Le Système métrique est un nouveau langage rationnel pour les échanges économiques, autant qu'un ciment de la République. Un système qui participe du projet de faciliter les échanges, entre des régions lointaines, avec des ressources complémentaires mais qui n'avaient pas pu se rencontrer faute de normes communes.

Pour ces promoteurs, à l'image de Condorcet⁴, le système s'inscrit dans la recherche d'un langage assurant une plus grande justice sociale, par une simplification du calcul de l'intérêt de chacun. Le système assure les mêmes droits à tout citoyen, et un accès au savoir, pour qu'il puisse devenir réellement libre. La Révolution consacre les noces de la science et de la démocratie, et l'accent porté sur le rapport à la « Nature » est tout à fait significatif: le mètre est défini par rapport à la longueur du méridien terrestre, pour élever cette création au-dessus des intérêts, le faire passer pour

du système de référence est récurrente. Mais au-delà de l'expression de ce souhait, le Système métrique prend des références reposant sur « la nature » alors qu'il était envisagé une généralisation des mesures parisiennes. La décimalisation est aussi une nouveauté, car le système en base 12 était répandu (Alder, 1995, p. 49).

⁴ C'est ce qu'il dessine dans son « Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain » (Condorcet, 1794). Cf. également (Baker, 1975) et (Alder, 1995, p. 40).

« non arbitraire » et indépendant de ses créateurs (Alder, 1995, pp. 49-50).

Dans cette période de turbulences politiques et de reconstruction des systèmes de légitimité, c'est aussi un projet de contrôle du territoire national, de contrôle social, de contrôle économique. D'ailleurs, le Système métrique mettra plusieurs décennies à s'installer dans les pratiques quotidiennes, et même scientifiques et techniques. Les gouvernements révolutionnaires n'ont pas réussi à l'imposer et les tentatives ont semé la confusion sur les places de marché. On peut adhérer à l'interprétation selon laquelle les ramifications de l'État n'étaient pas suffisantes et profondes pour assurer le basculement des systèmes de référence (Wise, 1995, pp. 92-93).

On saisit les parallèles entre les philosophies sous-jacentes aux projets du Système métrique et du Conservatoire, leur caractère complémentaire également, avec la perspective du développement économique, industriel d'une part, et la volonté de donner accès aux savoirs et aux techniques, pour l'émancipation des citoyens.

En outre, dès les premiers temps de la mise en place du Système métrique, le Conservatoire est un établissement mis à contribution pour la confection et la diffusion des étalons métriques. L'académicien Alexandre Vandermonde (1735-1796) est intervenu dans la mise en place du Système métrique (Guedj,

2000⁵), et devient un des premiers démonstrateurs du Conservatoire. Dès 1795, il poursuit les travaux scientifiques sur l'étalon du mètre. Le Conservatoire reçoit à ce moment-là, en dépôt, le prototype d'étalon de longueur de Lenoir⁶, et, sous le pilotage de Vandermonde, lui incombe la charge de réaliser des copies à envoyer ensuite dans les départements (Morin, 1870a, p. 602). Alors que le Conservatoire n'est pas encore organisé complètement, un atelier est mis en place pour cette série de réalisations.

Imposer le Système métrique

Durant la phase révolutionnaire, l'an III particulièrement, se tissent les premières relations entre le Conservatoire, le Système métrique et l'activité métrologique. Sortie de cette phase, le contexte napoléonien impose une inflexion de trajectoire. Napoléon en effet renvoie la France à des anciens standards et c'est seulement sous la Monarchie de Juillet que le système sera installé, par la loi. En 1837, sous le ministère Guizot, le Système métrique est rendu obligatoire à partir de janvier 1840, à l'exclusion de tout autre système d'unités⁷. Le 17 avril 1839 est également organisé le Service de véri-

⁵ Voir en particulier le chapitre XIV.

⁶ Ce prototype en laiton est présenté au Comité d'Instruction publique le 6 juillet 1795.

⁷ Pour cette partie, nous renvoyons à l'ouvrage sur la diffusion du Système métrique en France et à l'étranger (Garnier, 1990).

ficateurs départementaux des poids et mesures sous la surveillance des préfets. Ils sont en charge de la vérification de l'application des unités métriques et de la précision des instruments de mesure, pour assurer de justes échanges.

La diffusion s'organise et s'amplifie en France comme à l'étranger. Le ministre du Commerce Cunin-Gridaine déclare en novembre 1841 son intention d'étendre les comparaisons avec les puissances commerciales en relation avec la France et d'offrir à chaque état une collection d'étalons métriques (mètre, kilogramme et litre). Le Conservatoire a produit et diffusé ces étalons métriques aux états, et 18 pays seront destinataires. C'est de cette époque que date l'entrée dans les collections du Musée des séries de poids et mesures étrangères en particulier russes, italiennes, allemandes, etc. Selon la loi de 1837, une première vérification des étalons devait avoir lieu avant 1849. Malgré l'insistance d'Arthur Morin, professeur de mécanique appliquée au Conservatoire, récemment nommé directeur du Conservatoire, et fervent industrialiste, rien n'est engagé avant 1848.

Dans cette première période, le Conservatoire joue son rôle d'acteur du développement économique, industriel, prenant part à l'emprise de l'administration étatique sur la société. Peu à peu le Conservatoire s'impose comme le partenaire adéquat du Système métrique, un lieu technique essentiel, bien loin des trajectoires des autres

Écoles de l'an III à caractère scientifique que sont l'École polytechnique et l'École normale supérieure. Il se construit des relations entre savants, industries et État, au niveau national et déjà international. Ces relations sont sous-tendues par le projet révolutionnaire d'imposer le Système métrique « à tous les temps, à tous les peuples » et conduiront le Conservatoire au centre de ces relations, après 1848 (Moreau, 1975)⁸. L'uniformité est une valeur cardinale pour les bureaucrates, les marchands, les consommateurs, les savants. La précision est nécessaire pour assurer, maintenir, autoriser cette uniformité (Wise, 1995, p. 93). L'uniformité et la précision correspondent à des besoins économiques, industriels, scientifiques et ils sont inscrits dans les gènes du Système métrique. Le Conservatoire assure progressivement une fonction de partenaire technique indispensable à la fabrication de la précision. Mais, alors qu'il avait été pensé comme un système émancipateur, le Système métrique est finalement imposé par la contrainte⁹.

⁸ Voir aussi (Garnier, 1990), (Alder, 1995) et (Alder, 2005).

⁹ Benjamin Constant (1767-1830) voyait dans l'uniformisation des « Poids et Mesures » le symbole de la tyrannie de l'uniformité, celle qui atomise les pouvoirs et coutumes locales, relayé par l'État moderne. Chapitre XIII « De l'uniformité » *in* (Constant, 1813).

Deuxième période – 1848-1900 : promouvoir le Système métrique

En avril 1848, le Conservatoire devient le dépôt central des étalons et prototypes du Système métrique, mission confiée par le ministre de l'Agriculture et du Commerce « *dans l'intérêt de la science et de l'industrie* » (Bernard, 1994, pp. 43-44; Le Moël et Fontanon, 1994). Le dépôt est désormais placé sous la tutelle de l'administrateur et physicien, Claude Pouillet. Il s'agit d'assurer la fonction de conservation des étalons de mesure, et leur mise à disposition des usagers. Le Conservatoire est pleinement dans les missions qui ont présidé à sa création : conserver une collection de machines en état de marche, pour les « démontrer » au public, les mettre à disposition des artisans, des industriels, dans une œuvre de développement technique et industriel national.

En prolongement des liens tissés avant 1848, le Conservatoire devient le cœur de toute l'activité de promotion du Système métrique décimal, dans un contexte encore complexe eu égard à la lente diffusion des références sur le territoire. Cette décision a pour effet immédiat de faire entrer dans les collections du Conservatoire plus de 200 appareils, notamment : la pile de Charlemagne comparée au kilogramme par Lavoisier, le mètre prototype en platine identique à celui des Archives et plusieurs kilogrammes en laiton provisoires de 1793 (Borda et Brisson) ainsi que tous les instruments

de précision du service de vérification du ministère (balances, comparateurs).

Dans les vingt ans qui suivent cette décision s'engage un vaste programme de vérification des étalons départementaux. Cela dit, la faiblesse des crédits ne permet pas de distribuer également les étalons prototypes aux départements dès 1848. La vérification décennale de ces étalons avait été prescrite par l'ordonnance de 1839, et, en 1852, sous le directorat d'Arthur Morin, un projet d'exécution est élaboré au Conservatoire mais ne reçoit aucune réalisation. Il faut attendre 1863 pour que cette vérification soit enfin mise à l'étude, conséquence des accords internationaux en train de se mettre en place (cf. *supra*).

Au fil du XIX^e siècle se construit ainsi le système de confiance adjacent à la transformation et à l'uniformisation des poids et mesures. Pour les pratiques quotidiennes, comme pour les échanges commerciaux et les travaux scientifiques, la question clé est : « à qui fait-on confiance » ? La symbiose entre l'État, l'industrie, le commerce et les savants, se comprend dans la mesure où il s'agit de donner une réponse solide, uniforme à cette question.

L'action de Morin et Tresca au Conservatoire

Le Conservatoire porteur des « Poids et Mesures » à l'échelle française, par l'entremise de son directeur Arthur Morin, intervient dès 1851 à l'Exposition universelle de Londres pour

faire la promotion du Système métrique (Bigourdan, 1901)¹⁰. C'est également la date de la première rencontre avec Henri Tresca qui jouera par la suite un rôle important comme professeur de mécanique, comme directeur adjoint et membre de la commission spéciale des poids et mesures de l'établissement (Fontanon, 1994; Belhoste, 1994). Ensemble, ils vont initier au Conservatoire le Laboratoire d'essais de machines, en 1851-52¹¹. Dans l'église du Conservatoire est installée une Salle des machines en mouvement. Ce laboratoire servira de modèle pour d'autres à l'étranger, puis inspirera le futur Laboratoire d'essais. Les comptes rendus des opérations réalisées dans ce laboratoire seront publiés dans les *Annales du Conservatoire* après 1861. Le Conservatoire, avec ce lieu technique sans équivalent, peut devenir le fer de lance de l'activité métrologique en France. Il est, avant les développements dans les pays voisins, le lieu où s'articulent les besoins industriels, les recherches plus académiques et les intérêts de l'État, civils et militaires. Faut-il encore souligner qu'Arthur Morin, de par son long mandat à la tête du Conservatoire (1849-1880), et sa promotion de général en 1854, est le personnage central de cette aventure.

L'Exposition universelle de Paris en 1867 est décisive dans le déploiement du Système métrique. Morin et Tresca jouent un rôle moteur qui aboutira par

¹⁰ Voir ci-après pour plus de détails sur ce contexte des Expositions universelles.

¹¹ Voir les notices biographiques, *ibid.*

exemple à faire adopter le système dans 14 pays¹², en même temps qu'ils assurent, en 1868, que tous les bureaux départementaux français soient dotés des trois étalons secondaires.

Peu de temps auparavant, en octobre 1863, le général Morin avait demandé la création d'une commission interne (composé de son adjoint Tresca, Froment, fabricant d'instruments de précision et Sibermann, conservateur des collections du musée) afin de procéder à la comparaison officielle des deux étalons du Conservatoire et de ceux des Archives (Morin, 1870b). L'opération terminée, les étalons et les instruments de précision sont réunis pour former une collection du musée sous la responsabilité de Silbermann.

Le Conservatoire, dans cette période, acquiert une place grandissante dans les « Poids et Mesures », par les travaux de Morin et Tresca, jusqu'à l'établissement du Laboratoire d'essais. Le Conservatoire devient le lieu d'où émanent les étalons, il faut réaliser la portée symbolique de cette prouesse technique pour mesurer l'aura de Morin, Tresca, du Conservatoire et de la France dans cette période, chargée

¹² En 1868, le Reichstag adopte un projet de loi portant sur l'introduction du Système métrique dont l'usage légal sera mis en vigueur en 1872, puis ce sera le tour de l'Autriche, du Danemark, de la Belgique et de la Hollande, de l'Espagne, etc. En 1872, ce sont 28 états et 490 millions de personnes qui dans le monde ont adopté le Système métrique des poids et mesures (Bigourdan, 1901; Moreau, 1875; Garnier, 1990).

de l'héritage révolutionnaire, républicain, universalisant. Nous sommes à l'apogée de la construction du réseau impliquant l'État, le Conservatoire et la Métrologie nationale.

L'institutionnalisation de l'activité métrologique au Conservatoire va de pair avec une extension du domaine du Système métrique. En septembre 1869, Napoléon III approuve le rapport proposant la création d'une Commission spéciale chargée de préparer les travaux d'internationalisation du Système métrique¹³. Morin aura convaincu de créer une commission internationale des Poids, Mesures et Monnaies, avec une section française. Cette section française devait être composée de Claude-Louis Mathieu (président), du général Morin (vice-président), de Tresca (secrétaire), d'Urbain Le Verrier, Auguste Laugier, Hyppolite Fizeau et Henri Saint-Claire Deville.

Après invitation des puissances étrangères, 26 pays acceptent, 15 délégués seront présents finalement, du fait de la guerre de 1870 (Marquet, 1975, p. 5-9). En août 1870 les savants se réunissent à la première Commission du mètre, au Conservatoire. Peu de temps après, à

Paris, se tient la Conférence diplomatique du mètre (1^{er} mars au 20 mai 1875) à laquelle 17 états signent le traité connu sous le nom de « Convention du mètre ».

Il n'est pas question ici de faire l'histoire de cette Commission internationale du mètre qui se tient à Paris, dans les locaux du Conservatoire, de 1870 à 1875. Mais de rappeler que Morin et Tresca y jouèrent un rôle de premier plan comme organisateurs. Une bonne partie des procès-verbaux des séances a été publiée dans les *Annales du Conservatoire* par les soins de Morin. Un temps fort a été, fin 1871, le choix du métal du mètre prototype européen soumis à la section française: le choix est celui du platine iridié dont la fonte eut lieu au Conservatoire le 1^{er} mai 1874 sous la direction de Saint-Claire Deville en présence du président de la République, Mac Mahon (Marquet, 1975, p. 7).

La création en janvier 1876 d'un « Bureau international des poids et mesures » BIPM installé sur recommandation du Général Morin au Pavillon de Breteuil, à l'entrée du parc de Saint Cloud, est un événement qui ne fut pas sans conséquence sur l'activité du Conservatoire. Depuis cette date, le Conservatoire a livré aux états qui ont adhéré à la Convention du mètre 30 étalons en platine du mètre à trait, 6 étalons en platine du mètre à bout de 40 kilogrammes.

La décennie 1880 débute sous d'autres auspices, même si le nouveau directeur du Conservatoire, Aimé Laussedat

¹³ La commission est prévue pour être présidée par l'académicien (depuis 1817), Mathien, arguant que « *comme toute économie de travail, tant matériel qu'intellectuel équivalant à une véritable augmentation de richesse, l'adoption du Système métrique qui se range dans le même ordre d'idées que les machines et les outils, les voies ferrées, les télégraphes, les tables de logarithmes, se recommande particulièrement sous le point de vue économique* » (Bigourdan, 1901, p. 250; Moreau, 1975).

(1819-1907), souhaite poursuivre l'entreprise de Morin. Le Laboratoire de Morin et Tresca est fermé, faute de crédits pour fonctionner, et cette fermeture sera définitive. Laussédât est lui aussi polytechnicien (X 1838), professeur de géométrie appliquée au Conservatoire (1871), général introduit dans la sphère militaire, mais il ne bénéficie pas des mêmes appuis politiques que son prédécesseur. Le Conservatoire entame un léger déclin, jusqu'à sa restructuration au tournant de 1900.

Dans le même temps, l'action internationale en « Poids et Mesures » a pour conséquence l'instauration d'un « Bureau national scientifique et permanent des Poids et Mesures » en 1880. Dans le rapport préalable au décret de création, il est écrit : « *Si le Conservatoire des arts et métiers satisfait aux besoins de la métrologie usuelle, rien n'avait été constitué en vue de la métrologie scientifique* »¹⁴. Le Bureau siège au Conservatoire, dans la logique de développement depuis 1848. Il est constitué de 14 membres¹⁵, représen-

tant les grandes institutions impliquées en France, en « Métrologie usuelle » et « Métrologie scientifique » (on notera que ces termes apparaissent probablement pour la première fois dans des textes officiels). Les prérogatives et les missions de ce Bureau sont la conservation des étalons, la construction de prototypes et le maintien des relations avec le BIPM.

Ce qui se noue au Conservatoire au milieu du XIX^e siècle prend d'autres formes en Angleterre et en Allemagne, avec des chronologies différentes. Mais on retrouvera la même grande constante de mise en symbiose des parties prenantes, dans la perspective d'établir des références et étalons nationaux, nécessaires à chacune. Ces comparaisons sont importantes pour comprendre l'évolution nationale vers le Laboratoire d'essais, et mieux saisir, à l'horizon international, la naissance, annoncée plus haut, du Bureau international des poids et mesures après 1875.

La Grande-Bretagne et le National Physical Laboratory

Pour proposer un raccourci des développements en métrologie dans le royaume britannique, disons qu'il est initié par quelques physiciens éminents : William Thomson (1824-1907), James C. Maxwell (1831-1879), Lord Rayleigh

¹⁴ Décret du 8 octobre 1880 et rapport au Président du 7 octobre 1880 (au Journal Officiel).

¹⁵ Le président est J.-B. Dumas (secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences), le vice-président est Joseph Bertrand (secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences), signent de l'importance prise par les « savants ». Les autres membres sont : Maury (directeur général des Archives nationales), Hervé-Mangon (directeur du Conservatoire des arts et métiers – il s'agit de la transition entre Morin et Laussédât), Sainte-Claire Deville (professeur à la Faculté des sciences), le Colonel Perrier (membre du Bureau des longitudes), l'Amiral Mouchez (directeur de l'Observatoire de Paris), Laussédât (alors directeur des études de l'École Polytechnique), Péligot (directeur des essais à la

Monnaie de Paris), Debray (maître de conférences à l'École normale supérieure), Mascart (professeur au Collège de France), Mayer (École centrale), Girard (directeur du Commerce intérieur au ministère) et Génot (vérificateur en chef des poids et mesures à Paris).

(1849-1919). Thomson, après ses études à Cambridge est venu en France, chez le physicien Henri Victor Régnauld (1810-1878), spécialiste des mesures thermométriques et ayant réalisé des travaux sur la normalisation des mesures de température. Thomson est impliqué par ailleurs, dans la Philosophical Society of Glasgow où se nouent les relations entre monde académique, commercial et industriel (Wise, 1995, p. 225). Thomson devient au milieu du XIX^e siècle un personnage central dans le complexe industriel-académique britannique, avocat de la mesure de précision en physique, acteur incontournable de ces questions dans les années 1840-1860. Il est aussi un artisan des réseaux télégraphiques, des liaisons intercontinentales du télégraphe électrique dont l'importance doit être soulignée. Thomson est au carrefour de la science, de l'ingénierie, du marché et du gouvernement britannique. Mais il n'existe pas de lieu dédié aux travaux de précision sur les étalons avant que Maxwell oriente le Cavendish Laboratory sur ce sujet, vers 1874 (Tunbridge, 1992 ; Smith, 1992).

Comme le rappelle Simon Schaffer dans (Wise, 1995), le lien entre la métrologie et les valeurs commerciales étaient très en vogue parmi les physiciens et ingénieurs victoriens. William Thomson disait à Maxwell en 1871 que l'établissement de nouvelles unités électriques serait populosé par les nouveaux marchés¹⁶. Maxwell

défendait ce *credo*, articulant les rôles du savant, de l'industriel et de l'État :

Physics must set up its standards as "national treasures". The man of business requires these standards for the sake of justice, the man of science requires them for the sake of truth, and it is the business of the state to see that our measures are maintained uniform.¹⁷

Le successeur de Maxwell au Cavendish en 1879 sera le « gourou » de la précision parmi les physiciens britanniques : John William Strutt, Lord Rayleigh. Il sera l'artisan, avec son assistant (et futur administrateur) Richard Glazebrook (1854-1935) du National Physical Laboratory installé à Teddington en 1899. Loin de se résumer à ces filiations entre professeurs de Cambridge, le développement du NPL, un des tout premiers grands laboratoires nationaux de métrologie, est appuyé par un ample réseau de collaborations, entre plusieurs institutions, qui travaillent ensemble à la définition des références, et à la notion de précision adéquate à ce projet¹⁸. Le rôle des militaires a été souligné par

express it in numbers, you know something about it; but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be. » (Wise, 1995, p. 136).

¹⁷ Citation reprise de (Wise, 1995, p. 136 et p. 164), tirée d'un texte de Maxwell datant probablement de 1867 « Dimensions of physical quantities » (Cambridge University Library).

¹⁸ Cf. en particulier les textes de S. Schaffer et N. Wise dans (Wise, 1995).

¹⁶ C'est dans ce cadre d'ailleurs qu'il faut interpréter la célèbre citation de Thomson : « *I often say that when you can measure what you are speaking about, and*

Martina Schiavon¹⁹, Alexandre Strange et Douglas Galton sont deux officiers qui suscitent l'implication de l'État sur ces questions. Ils font en sorte de concilier les prétentions des scientifiques et les intérêts de l'État.

Le NPL devient le lieu clé de voûte du système de confiance qui se construit en Grande-Bretagne. Il faut réaliser qu'il s'agit d'un processus de 30 ans de débats, de réflexions, sur les missions et enjeux d'un tel établissement. Son caractère « national » est également circonstancié : il est lié à la question d'un financement par l'État, qui est un enjeu et non un acquis à ses débuts ; cette prise plus directe de l'État sur le NPL est congruente aussi à l'extension de l'Empire et la standardisation des produits dans les colonies.

L'Allemagne et le Physikalisch-Technische Reichanstalt

La trajectoire allemande est différente, sur le fond, car la construction de la confiance et la crédibilité des étalons reposent davantage sur des choix de méthodes et de procédures. Les méthodes visant à éliminer les erreurs, fiabiliser les mesures, sont plus importantes que la confiance dans des savants ou des laboratoires prestigieux : confiance dans les procédures, plus que confiance dans ceux qui opèrent les mesures (Wise, 1995, p. 228). La méthode des « moindres

carrés » pour la réduction des erreurs de mesure se développe sans conteste en Allemagne à cette période (initié par Carl Gauss, Friedrich Bessel et Heinrich Dove). Kathryn Olesko souligne que les universités Allemandes, accueillant des étudiants de la classe moyenne, en particulier issue des services publics, partagent cet attachement aux procédures : la vie de ces étudiants au sortir de ce moule entre d'autant plus en résonance avec les sirènes de la bureaucratie, privilégiant elle-même les procédures uniformes. Alors que des universités comme Cambridge et Oxford, universités privées, sans le contrôle direct de l'État, dont les professeurs ne sont pas serveurs de l'État, assurent une fonction de gentrification : elles conduisent les étudiants ainsi formés à adhérer à d'autres valeurs que ces procédures, privilégiant la reconnaissance des pairs.

La création du Physikalisch-Technische Reichanstalt, en 1887 la première institution nationale scientifique et technique, répond aux besoins de l'Empire bismarckien²⁰. Le pays est dans une ère d'unification politique, de modernisation de l'État, de développement industriel sans précédent : les références nationales, les standards sont des ingrédients indispensables à ce processus indissociablement scientifique, industriel et politique. Le PTR est très directement associé au développement des industries électriques et optiques qui ne peut pas

¹⁹ Voir les pp. 337-38 tout particulièrement de (Schiavon, 2014).

²⁰ L'étude la plus complète et approfondie, dont nous tirons les grandes lignes, « An Institute for an Empire », résume cette perspective (Cahan, 1989).

faire sans une recherche technologique à base de recherches scientifiques de premier plan. Terry Shinn a montré que la genèse du PTR est le fruit de négociations entre plusieurs groupes d'acteurs : les industriels, les ingénieurs et savants, les fabricants d'instruments, tout particulièrement ceux de mécanique et d'optique (Joerges et Shinn, 2001).

Les principaux artisans du PTR sont ses promoteurs et leaders : Werner Siemens (1816-1892) et Heinrich Helmholtz (1821-1894). Le premier est un scientifique accompli et industriel de renom ; c'est lui qui va financer la construction du PTR, et placer le second, son ami et physicien probablement le plus célèbre de son temps, Helmholtz, à la tête du PTR. Le PTR tel qu'ils le conçoivent est un établissement de l'État impérial mais Siemens ne veut pas seulement un laboratoire dédié aux besoins technologiques directs, et rentables. Il souhaite un laboratoire de recherches « pures » s'intéressant aux questions technologiques, ce qui ne s'instaurera pas sans réticences. Au final, le PTR parvient à concilier les intérêts des parties prenantes, en un programme clair.

Divergences nationales, convergence internationale

Les situations allemande, anglaise et française ont des dynamiques différentes, tout en répondant aux mêmes enjeux qui sont à la fois de définir un système de référence, de construire une confiance dans ce système pour

l'adhésion de tous, d'assurer sa dissémination dans une économie et sur un territoire. Il faut également entretenir dans le temps le système, le perfectionner, améliorer la précision. La création d'un laboratoire national marque la maturité scientifique, industrielle et politique de l'État, et il entérine ces relations symbiotiques. C'est un aboutissement du processus, à la fin du XIX^e siècle, dont les fruits viendront au fil du XX^e siècle.

Nous avons vu, en outre, que la dynamique en France, entre Système métrique et Conservatoire, repose sur un système qui mûrit depuis 1790. La clarification de cette organisation est en quelque sorte décalée dans le temps par rapport à la maturité de son assise scientifique. L'entreprise de l'étalonnage du mètre sur la méridienne, et de nombreux autres travaux sur les masses ou les températures, ont donné un certain prestige à la France et permis d'installer un système pour assurer la qualité des mesures. Mais à l'inverse de la situation britannique et allemande, il faut souligner qu'avec la création du Laboratoire central de l'électricité, la dynamique sur la fin du XIX^e siècle n'est pas à la convergence organisationnelle. En effet, après l'Exposition internationale de l'Électricité en 1881 et le Congrès des électriciens, se met en place, en 1882, le Laboratoire central de l'électricité (LCE) (Caron et Cardot, 1991 ; Grelon, 1997). Il s'agit au départ de prolonger les travaux du congrès, sur les études des étalons électriques. Il prendra en charge les questions scientifiques et techniques

d'une industrie électrique en plein essor, devenant un service technique pour l'industrie. C'est ce que fait le PTR en Allemagne par exemple. Le LCE fera émerger parallèlement l'École supérieure d'électricité pour former les ingénieurs de cette industrie.

En même temps que s'organisent ces réseaux nationaux, le dernier quart du XIX^e siècle est très marqué par la recherche d'accords transnationaux et internationaux. Chaque trajectoire nationale a, là encore, ses spécificités : alors que l'Empire britannique, en 1824, avance son Système d'unités impériales²¹, auquel il restera longtemps attaché (malgré les tolérances introduites à l'égard du Système métrique), l'État allemand introduit le Système métrique entre 1868 et 1872. Mais plusieurs motivations président aux tractations pour définir des accords internationaux sur les systèmes de référence. D'un point de vue politique et commercial, les marchés et le libre-échange s'organisent à l'échelle européenne, avec la signature de traités entre la France, l'Angleterre et d'autres pays, dès 1860. L'entourage saint-simonien de Napoléon III, et le général Arthur Morin, en première ligne, organise ces traités. Sa mission au Conservatoire est un écho à cette perspective de développement économique et industriel. Morin est persuadé que pour affronter la concurrence, l'économie française doit être soutenue par une réforme pro-

fonde de l'enseignement technique et industriel.

D'un point de vue scientifique et technique, les questions du télégraphe et de l'électricité sont une motivation importante pour faire converger les standards. Les réseaux télégraphiques transcontinentaux, transocéaniques comme les théories de l'électromagnétisme et les mesures de précision, sont des défis pour la communauté scientifique internationale. Thomson comme Siemens en sont deux figures et promoteurs majeurs.

Dans le domaine de la géodésie, les savants et les militaires constatent les différences systématiques entre les grandes triangulations européennes en cours (Moreau, 1875, p. 48). La définition du mètre révolutionnaire, sur la base du méridien, est progressivement contestée, insuffisante pour les applications. En 1867, la seconde Conférence générale de l'Association géodésique internationale réunie à Berlin reconnaît la nécessité de fixer l'unité commune de mesure pour tous les pays de l'Europe et elle se prononce, dans l'intérêt de la science en général et de la géodésie en particulier, pour le choix du Système métrique, la construction d'un nouveau mètre prototype européen et pour la création d'un « Bureau international européen des poids et mesures ».

L'internationalisation procède parallèlement par les Expositions universelles, dont on a déjà souligné l'importance. Elles sont autant des lieux

21 « Weight and Measure Act », 1824.

de célébration des progrès de la science et la technique, d'échanges, de prestige et de rivalités politiques à travers la mise en valeur de puissances industrielles et d'empires en construction. Dès 1851, à la première exposition de Londres, le visiteur est « *en présence de l'immense variété de produits envoyés de toutes les contrées du monde, et dont la valeur, ainsi que les quantités, étaient rapportées à toutes sortes d'étalons de mesure* » (*ibid.*, pp. 47-48). En parallèle de ces expositions sont organisées des Conférences et Congrès internationaux²². C'est le terrain investi par les promoteurs du Système métrique, pour son extension à l'échelle mondiale.

Le choix des systèmes de référence est un sujet majeur à l'international, il n'en reste pas moins que la question de l'organisation nationale, de la définition des prérogatives sur la métrologie est loin d'être résolue en France : la création du LCE, puis du Laboratoire d'essais engage une phase de crises, non résolues avant les années 1960.

Troisième période – 1901-1960 : le Laboratoire d'essais du Cnam peut-il être << national >> ?

Le xx^e siècle s'ouvre au Cnam par une réforme profonde des statuts de l'institution, notamment avec la création d'un conseil d'administration contrebalançant le pouvoir jugé trop important par le ministère du corps professoral (Fontanon, 1998). La création d'un Laboratoire d'essais grâce au financement de 500 000 francs par la Chambre de commerce de Paris constitue par ailleurs un tournant avec la création d'une section de métrologie. C'est un moment décisif mais qui n'aboutit pas à la dynamique de laboratoire national anglais ou allemand, alors en plein essor. Le LE prend l'adjectif « national » surtout parce que le Conservatoire devient lui-même « national ». Ce malentendu n'en est qu'un parmi d'autres. Surtout, les missions et les objectifs du LE ne sont pas clarifiés et il est nécessaire de pointer les choix de son promoteur, Gaston Hartmann, pour comprendre le développement du laboratoire. Cet état de fait se poursuivra jusque dans les années 1960, avec la répétition de crises d'identités successives. Par ailleurs, si une expertise dans ce domaine est confiée au Conservatoire, aucun enseignement n'est alors envisagé dans cette institution de formation, pas même dans le cours de physique générale donné par Jules Violle, puis Jules Lemoine, et ce jusqu'en 1936.

²² De la géodésie précédemment citée, à la mécanique, l'électricité... jusqu'aux arts et lettres, anthropologie, etc. (Rasmussen, 1989).

Le LNE : une naissance sous tension

Le Laboratoire est créé en 1900 dans un contexte où le scientifique se mêle au politique, et sur fond de tensions, à l'intérieur du Cnam²³. La Société des ingénieurs civils s'est faite l'avocat d'un laboratoire destiné à revivifier l'effort de l'entreprise passée d'Arthur Morin et Henri Tresca, feu le Laboratoire d'essais des machines. Le projet des ingénieurs civils est rival du LCE qui a été institué en 1882, alors en pleine croissance. Le tout se déroule sur fond d'Exposition universelle à venir, en 1900, et d'une question de prestige national, de rayonnement scientifique et technique de la France. Dans le gouvernement Waldeck-Rousseau (1899-1902), Alexandre Millerand prend fait et cause pour les ingénieurs civils et instaure le Laboratoire d'essais, sous la responsabilité de l'Office du commerce extérieur et de la Chambre de commerce. Le Laboratoire doit être placé au Cnam. Au fond reste en suspens la question de la fonction exacte de ce laboratoire : quelles missions est-il censé remplir ? Quelles relations doit-il entretenir avec les industriels ? De 1900 jusqu'à la crise des années 1960, la réponse à cette question a changé plusieurs fois et les tensions naissent précisément entre acteurs incapables de s'accorder sur ces missions.

²³ Voir notamment (De Monzie, 1948) et (Bernard, 1994). Le chapitre IV de (Schiavon, 2014) en donne le compte rendu le plus rigoureux et actualisé.

Martina Schiavon a montré les tenants et aboutissants de l'imbroglorio lié à la création du LE, nous nous référons à ses travaux, tout particulièrement concernant l'acteur principal, mais pourtant mal connu des historiens : Gaston Louis Hartmann (1851-1922). Il entre dans cette histoire bien avant que le laboratoire ouvre ses portes : délégué par Millerand, il agit en qualité de chef du Bureau national scientifique et permanent des poids et mesures (qu'il préside en 1899) pour dessiner le laboratoire²⁴. Hartmann a plusieurs ambitions, celle d'uniformiser les mesures dans les industries civiles et militaires, et plus personnellement, de généraliser l'emploi de ses inventions dans toute l'industrie. Il a formé des projets au niveau de l'armement pour cela, et entre 1899 et 1901, il agit activement pour créer un laboratoire adéquat. Son expérience et son ambition l'incitent à chercher une solution hors du Bureau national, à l'écart du BIPM. Dans l'esprit d'Hartmann le Laboratoire de Morin et Tresca avait été couronné de succès et il regrettait sa fermeture. Soulignons aussi que le Conservatoire a des rapports privilégiés au militaire, et à l'École polytechnique,

²⁴ Il préside la Commission technique destinée à instituer le Laboratoire. Hartmann, polytechnicien (X 1872), officier d'artillerie, est l'inventeur d'un comparateur-enregistreur (vers 1891) qui lui vaut une réputation importante au BIPM et à la Commission française du mètre. Son instrument permet de contrôler des objets à partir du mètre-étalon. Hartmann est directeur de l'Atelier de précision à partir de 1891 et c'est là qu'il conçoit le comparateur. Le physicien Alfred Cornu le fait connaître à l'Académie des sciences (Schiavon, 2014, pp. 245-46).

et qu'Hartmann est membre du conseil d'administration du Conservatoire. La rencontre d'intérêts avec le projet des ingénieurs civils conduira à instaurer le LE au Conservatoire.

Avec le premier projet pour le LE esquissé par Hartmann, arrive l'opposition ferme des physiciens Eleuthère Mascart et Jules Violle. Pour défendre son projet Hartmann fait un rapport sur la situation à l'étranger, avec les yeux rivés sur les réalisations allemandes au sein du PTR²⁵. Celui-ci est organisé par un programme défini selon les besoins de la science et de l'industrie, et délivre en particulier les procès-verbaux d'essais pour les industriels : Hartmann préjuge que ce service est le seul indispensable. Dans la *Revue scientifique* en 1901 la perspective dressée par Hartman est résumée clairement :

[...] Nous le répétons, il faut des laboratoires d'essais véritables, des laboratoires destinés aux essais dont le public a besoin, et non des laboratoires de recherches scientifiques où l'argent de service ne servira qu'à acheter un matériel destiné à des expériences scientifiques imaginées par un théoricien. Personnel et matériel ne devant pouvoir servir qu'aux essais industriels, l'un et l'autre devant être choisis en vue de cette fin très précise seule.²⁶

25 L'activité métrologique est en plein essor au PTR (Cahan, 1989). Le seul titre du rapport de Hartmann publié en 1901 est éloquent : *Annales du Conservatoire*, 1901, 3^e série, Tome III, « Rapport de la commission d'enquête sur les laboratoires officiels d'essai de Berlin, Munich, Dresde, Vienne et Prague », pp. 93-162.

26 Précisons que le texte en questions n'est pas

En cela il s'oppose à ceux qui n'imaginent pas un service aux industries sans un travail de métrologie scientifique, sur les références et la conservation des étalons. Au sein du Conservatoire, Mascart appuie la candidature du physicien Alfred Pérot²⁷ (1863-1925) à la direction du Laboratoire en 1901. Pérot représente une spécialité française de la mesure de précision, avec des physiciens attachés à développer leur propre instrumentation. Mais cette voie de la métrologie, appuyée par des recherches en optique, c'est précisément tout ce qu'Hartmann veut éviter²⁸.

Malgré cette opposition, Pérot est nommé directeur du Laboratoire par le conseil d'administration du Cnam. Hartmann démissionne de la Commission (mais reste au conseil d'administration du Cnam), en protestation. L'Académie des sciences (représentée par Mascart) et le BIPM soutiennent Pérot. Le projet de Pérot était de faire du LE l'atelier technique du Bureau national et du BIPM. En ce sens, sa crédibilité du point de vue des industriels s'est affaiblie.

explicitement signé Hartmann, mais de manière énigmatique il est signé « Z. » : le texte rentre dans de nombreux détails de l'enquête, il est polarisé par le PTR et à travers les conclusions qu'il dresse, il n'y a que peu de doute sur l'auteur (Hartmann, 1901, pp. 806-809).

27 Polytechnicien, physicien, spécialiste d'optique, inventeur avec Charles Fabry de l'interféromètre Fabry-Pérot, un instrument essentiel dans les mesures physiques.

28 Pour plus de détails sur Pérot, ses travaux, les opticiens français, nous renvoyons à (Schiavon, 2014).

Ce n'est que le début des tensions, qui conduiront Pérot à démissionner en 1907²⁹. Les chefs de section du LE sont en désaccord avec Pérot, en particulier dans le type de relations à établir avec les industriels : ils souhaitent construire une relation de service d'expertise, plus proche des intérêts industriels et qui serait rentable. Le successeur de Pérot sera le Capitaine Ferdinand Cellier, adoubé par Hartmann, et qui cantonnera le Laboratoire dans les essais et contrôles pour l'industrie (De Monzie, 1948, pp. 107-120). Ainsi se conclut une première période très conflictuelle, avec beaucoup de tensions internes au Cnam, et surtout une absence de projet pour ce laboratoire. Impossible de trouver un consensus entre les deux parties qui s'opposent, qu'on peut qualifier de « savants » versus « industriels » ou encore « physiciens » versus « techniciens ». La situation est très différente du NPL et du PTR, dans lesquels ces questions ont déjà été posées et résolues au XIX^e siècle.

Nouvelle tentative d'établir un laboratoire « national » de métrologie et d'essais

Le LNE se retrouve à un nouveau carrefour de son histoire dans les années 1930. Jules Lemoine, professeur de physique au Cnam, et par ailleurs di-

recteur de l'École supérieure des poids et mesures³⁰, obtient que Pierre Fleury vienne donner les premiers cours de métrologie au Cnam (voir ci-dessous). C'est un élève de Fleury, George-Albert Boutry (1904-1983) qui, au sortir de sa thèse, prendra en charge la direction du LE, succédant à Cellier. En mission de rénovation du LE, Boutry développe un projet privilégiant la métrologie primaire du fait que la mission de conservation des étalons devient effective et importante pour le Cnam et le LE. Et sans perdre de vue la mission de service à l'industrie qui doit aussi être celle du LE³¹.

La ligne de Boutry ne fait cependant pas l'unanimité, il se trouve face à des conceptions différentes des missions du LE, au sein même du Cnam. La situation de 1900-1907 semble se

³⁰ Cette école est dénommée aujourd'hui « École supérieure de métrologie », créée par décret en 1929. Elle forme les agents du Service des instruments de mesure (anciennement Service des poids et mesures), c'est-à-dire les agents de la métrologie légale.

³¹ Boutry exprime ainsi cette double perspective en 1938 : « *L'usine et l'atelier ont besoin d'appareils de mesure capables d'une extrême précision. Il est nécessaire de contrôler ou de vérifier périodiquement le fonctionnement et les propriétés de ces appareils. Il doit donc exister, dans la Nation, un organisme central capable de réaliser des étalons de mesure définis sans ambiguïté avec une précision supérieure à l'incertitude la plus petite de la mesure dans l'industrie ; cet organisme doit aussi disposer de méthodes de mesure qui garantissent une précision supérieure à celle dont sont capables les appareils à vérifier eux-mêmes. Ainsi les USA disposent du National Bureau of Standards, la Grande-Bretagne du National Physical Laboratory, l'Allemagne du Physikalisch-Technische Reichsanstalt* », cité dans la notice de George-Albert Boutry (Fontanon, 1994).

²⁹ Il faudrait plutôt dire qu'il est destitué, et qu'il poursuivra sa carrière à l'École polytechnique et à l'Observatoire.

rejouer³². Par ailleurs, le problème des moyens est récurrent, malgré ou à cause de la construction du nouveau bâtiment, rue Gaston Boissier : cette construction promet d'apporter des équipements de pointe au Laboratoire, mais il grève le budget du LE pour de nombreuses années³³. Ce cumul de problèmes conduit Boutry à démissionner de la direction du LE en 1949. Maurice Bellier lui succède (voir l'article de Loïc Petitgirard dans ce dossier pour les détails sur cette succession).

Encore une fois, la trajectoire s'écarte de celle de l'Allemagne et de la Grande-Bretagne. La question administrative est importante également : le Cnam est une institution de formation

³² En 1949, à l'heure de désigner le successeur de Boutry, Albert Métral, professeur au Cnam, rédige une lettre à l'adresse du président du conseil d'administration du Cnam, l'Amiral Lucien Lacaze, pour soutenir la candidature de Louis Longchambon, qu'il considère comme un futur directeur excellent. Ce faisant, il critique la gestion de George-Albert Boutry, qu'il estime coupable d'avoir transformé un laboratoire d'essais en laboratoire de recherches ne faisant plus assez d'essais. Et il tacle également la candidature de Maurice Bellier, qu'il juge déplacée étant donné son curriculum [Archives du Cnam, Dossier Maurice Bellier, Candidature au LNE].

³³ La construction est coûteuse car de tels bâtiments, adéquats aux besoins métrologiques du milieu du xx^e siècle, doivent avoir des fondements très solides, isolés de toute vibration pour ne pas perturber les mesures. C'est le cas dans tous les laboratoires métrologiques, PTR, NPL, etc. Cela explique en partie la durée des travaux et leur coût. La consultation des bilans financiers du LNE des années 1960 montre un déséquilibre persistant lié au remboursement du coût de cette construction inauguré 20 ans auparavant (ce qui est un des facteurs de la crise du Laboratoire à ce moment-là) [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil de perfectionnement – 1960-67].

technique qui accueille un laboratoire de service à l'industrie et dont les liens au reste de l'établissement se sont distendus rapidement. Le LE a pesé sur le Cnam étant donné sa taille, et le conseil d'administration a géré une structure double, avec des missions non convergentes. Ce qui a handicapé aussi bien le développement du LE que du Cnam.

À côté du LE, le LCE poursuit son chemin, la comparaison est peu flatteuse pour le LE : hormis sur les questions d'électricité et d'éclairage, la France, n'est pas représentée dans les Comités internationaux des poids et mesures. La métrologie est écartelée entre le LE, le LCE, le BIPM et les laboratoires disséminés dans les universités et institutions s'intéressant à cette question. Dans cette configuration, le soutien de l'État au LE n'est plus assuré. C'est dans les grandes lignes, la situation des années 1960, avant la création du Bureau national de métrologie³⁴.

Des inquiétudes jusqu'au premier cours de métrologie au Cnam

Parallèlement à l'histoire du LE, c'est en 1932 et sous la présidence du mathématicien et ministre Paul Painlevé que la création d'un cours de métrologie est proposée, financement à l'appui, par la Chambre de Commerce de Paris, dont le président Henri Garnier est membre du conseil d'administration

³⁴ C'est l'objet du texte de L. Petitgirard dans ce dossier.

du Cnam³⁵. Cette dotation fait suite à une lettre du sous-secrétaire d'État à l'enseignement technique, Charles Pomaret, le 10 février 1932, demandant au Cnam de créer un cours public traitant des unités métriques, des techniques de construction et de contrôle des appareils de mesure³⁶.

Préliminaire à l'organisation du cours, un rapport daté de juin 1932 souligne qu'il doit être orienté vers les applications techniques sans négliger le côté scientifique³⁷. Car pour les recherches en métrologie, le rapporteur note que la France est tributaire de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne, des États-Unis, de la Suisse et du BIPM. La prise de conscience de cette dépendance est assez claire, bien avant les années 1960, et sous-entend des aménagements d'ampleur mais qui ne se concrétiseront que sous forme de cours, pour l'heure.

Sur la base de ce rapport, le cours devait avoir pour objectif de former des techniciens pour l'industrie en deux années. Une commission d'examen des

candidatures à la Chaire est formée en juin 1932; elle se réunit le 20 octobre pour l'audition des deux candidats, Pierre Fleury et René Audubert, futur professeur d'électrochimie au Conservatoire (1946). Ce dernier ne recueillant aucune voix lors du vote de la commission, c'est Pierre Fleury (1894-1976) qui est recruté le 4 novembre 1932 alors que le président de la Chambre de Commerce de Paris accepte de présider la leçon inaugurale du nouveau professeur. Son programme de cours de métrologie générale et industrielle est adopté par le conseil de perfectionnement, le 4 juillet 1932. Il propose un tour d'horizon sur les mesures, les mesures géométriques, les mesures mécaniques, de la chaleur et de la thermodynamique de l'acoustique et de l'optique³⁸.

Pierre Fleury³⁹ a 38 ans lorsqu'il est nommé. Normalien, il a conduit ses recherches à l'École normale supérieure, sous la direction de Henry Abraham, dans le domaine de la photométrie. Ses publications témoignent d'une intense activité de recherche dans le domaine de

35 [Archives du Cnam : fonds CDHT [4-5], Lettre du président de la Chambre de commerce de Paris au directeur du Cnam, 31 mai 1932.] Ce dernier est remercié par le directeur pour la subvention de 50000 francs .

36 [Archives du Cnam : fonds CDHT [4-5], Lettre de Charles Pomaret, sous-secrétaire d'État à l'enseignement technique au directeur du Cnam, 10 février 1932.]

37 [Archives du Cnam : fonds CDHT [4-5], Procès-verbal de la commission du programme du cours de métrologie, 26 juin 1932.]

38 [Archives du Cnam : fonds CDHT [4-5]; Cours de métrologie : les mesures dans l'industrie et le commerce (programme), 1932.]

39 Fleury a été reçu premier au concours d'agrégation de sciences physiques en 1920, avant de s'engager dans la recherche, et obtenir le grade de docteur en 1925. Il fait alors une carrière d'enseignant, de chercheur et d'administrateur. À la faculté de Lille, il enseigne de 1928 à 1936 la physique classique, thermodynamique, électricité, optique géométrique, rayonnement et astrophysique. À Lille, il entreprend des études sur l'application des récepteurs photo électroniques à divers problèmes de photométrie et de spectrophotométrie (Mathieu, 1994).

l'optique. Il est nommé en 1936 à la succession de Jules Lemoine, à la Chaire de physique générale, tout en conservant la charge de l'enseignement de métrologie. Il restera au Cnam, dans cette chaire, jusqu'à sa retraite en 1964.

Il faut souligner ce point singulier : Fleury fait un cours de métrologie, mais n'est pas attaché à une chaire de métrologie. Cette chaire ne sera créée qu'après son départ en retraite, dans un tout autre contexte (voir le texte de Loïc Petitgirard sur cette création).

Au Cnam, Pierre Fleury semble s'être totalement investi dans sa mission. Très vite, il met sur pied des travaux pratiques, il obtient l'affectation d'un ingénieur des poids et mesures, Costa Magna, et entend constituer un embryon de laboratoire de recherche⁴⁰. Il veut y installer un densitomètre à cellule photoélectrique mis au point par Georges-Albert Boutry, professeur au lycée Saint Louis qui a fait sa thèse sous sa direction : il sera bientôt le directeur du LNE. On saisit l'opportunité à ce moment précis d'un rapprochement des activités d'enseignement et de recherche en métrologie.

Le cours de Fleury subsiste jusqu'en 1964 à raison de 20 leçons par an. Les effectifs des cours varient entre 55 et 79 élèves entre 1936 et 1940. Fleury publie chez Hermann ses *Leçons de métrologie* de 1935 à 1938 et participe aux *Journées internationales de métrologie* en juin 1938 à Paris⁴¹. 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 1960⁴².

Le nombre d'auditeurs s'étiole pour diverses raisons, que nous n'avons certainement pas toutes élucidées. Dans les années 1930, les cours du Cnam bénéficient d'une faible, voire inexistante concurrence, ce qui n'est plus le cas après 1950. Parallèlement, il semble que Fleury ait partagé son temps entre le Cnam et la direction de l'Institut d'optique après la disparition de Charles Fabry en 1945, direction qu'il conserve jusqu'en 1968. Ajoutons que Fleury est un physicien, spécialiste de l'optique, mais de moins en moins un spécialiste de métrologie : difficile d'imaginer que ses cours puissent bénéficier d'une publicité soignée dans un tel contexte.

⁴⁰ En juin 1938, dans un rapport sur le fonctionnement de son cours, Fleury précise que, comme chaque année, les leçons ont été accompagnées d'expériences et de démonstrations d'appareils provenant du Musée ou de constructeurs, des clichés ont été projetés, le cours photocopié, des entreprises visitées : avec ses élèves, il visite les ateliers de métrologie des Établissements Citroën, les laboratoires des poids et mesures du ministère du Commerce (1935) [Archives du Cnam : Fonds Thiercelin n° 68, lettre du 4 décembre 1933].

⁴¹ [Archives du Cnam : Fonds Thiercelin, n° 68.] (Fleury, 1935, 1938.)

⁴² [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil de perfectionnement – 1945-1964, Statistiques de l'enseignement (cours de métrologie).]

Conclusion

Au sortir de la seconde guerre mondiale, le panorama de la Métrologie nationale est modifié par l'entrée en jeu d'un acteur, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) qui est une priorité scientifique et technique dans la reconstruction. Le CEA s'occupe des activités liées à la radioactivité. L'Observatoire de Paris continue à émettre les signaux horaires de référence. Le LCIE a la tutelle sur la métrologie électrique, suite aux négociations avec le Cnam (depuis 1942). Au Cnam le LNE poursuit ses activités, mais Boutry claque la porte en 1949 considérant qu'il lui est impossible de maintenir les activités de recherche et d'essais dans le cadre existant. Fleury continue ses cours au Cnam, même si le public suit de moins en moins. Cette situation se double d'une certaine absence des comités internationaux (à l'exception notable des comités de l'électricité, à travers le LCIE), alors que la France, dans tous les esprits, est la nation qui a inventé le Système métrique. La situation est bien loin de celle projetée par Morin et Tresca au XIX^e siècle.

Dans les années 1960, le système métrologique français a déjà une histoire chargée et des lacunes qui seront assez évidentes pour les acteurs et analystes du moment. Au centre du dispositif se trouve le Cnam, fruit de ces relations complexes, constamment renforcées même si d'autres institutions ont pris leur part de la Métrologie nationale au fil du XX^e siècle. Si à la fin du XVIII^e siècle, ces relations étaient surtout de circonstances, une sorte

d'évidence de l'an III, elles ne se sont pas démenties. L'évidence a été renforcée par l'institutionnalisation progressive au XIX^e siècle, appuyée par les convictions et l'ampleur du travail d'Arthur Morin. Le fait d'avoir été piloté par des polytechniciens et plusieurs généraux, Morin et Laussédats tout particulièrement, n'y est pas étranger: au XIX^e siècle, ces ingénieurs militaires étaient particulièrement bien informés des besoins des industries militaires et civiles.

Le Conservatoire s'est fait relais et promoteur du Système métrique, la dynamique de l'un allant avec l'internationalisation de l'autre. Mais le Cnam semble progressivement sortir de la partie. Le LNE s'enfonce dans une crise commencée au début du XX^e siècle qui s'aggrave: crise financière, crise d'identité, tensions autour de la définition de ses missions. Il ne parvient pas à maintenir et faire coexister les activités de contrôle légal et celles de métrologie scientifique: c'est un point d'achoppement récurrent de ce laboratoire. L'histoire de la section de métrologie du LNE reste cependant à faire dans le détail, pour déterminer les tenants et aboutissants de ces travaux pourtant nombreux. Peut-être faut-il compter ces divergences entre activités d'essai et de recherche comme un paramètre essentiel parmi ce qui a fait défaut dans l'organisation nationale. En Grande-Bretagne et en Allemagne, la bonne entente de ces deux pans de l'activité métrologique a été une condition du développement du NPL et PTR. Le cas français est différent. Comment

expliquer cette impossible entente à partir de 1900 et avant la restructuration des années 1960 ? Le dialogue difficile entre physiciens et industriels⁴³ (de manière générale), la perte de lien fort et stable entre militaires et scientifiques, les différenciations et spécialisations croissantes des formations des scientifiques, des ingénieurs et des militaires : chaque paramètre a peut-être sa part dans le bilan, sans qu'il soit possible d'en singulariser un spécifiquement.

Au fond, malgré tout, c'est l'État, la République sous de Gaulle, avec l'émergence d'une politique scientifique, technique et industrielle nationale qui reprend le système en main. Car la question de la métrologie scientifique, son organisation, le bon développement des contrôles légaux, sont déterminants économiquement, scientifiquement, industriellement parlant. La sphère militaire considère ce champ également comme stratégique dans les années 1960, comme cela a été le cas au XIX^e siècle. À la manœuvre de la restructuration sous de Gaulle on retrouvera trois acteurs essentiellement⁴⁴ : le Cnam (du fait de ses missions et l'héritage construit durant 150 ans), la DRME (Direction des recherches et moyens d'essai, c'est-à-dire la

direction pilotant les recherches militaires en France) et la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique, chargée de construire un pilotage de la recherche civile). Tout concorde alors pour relancer les relations entre État, industrie, militaire et métrologie, certes sur une dynamique renouvelée, mais avec les mêmes préoccupations de développement économique, stratégique et de contrôle (social, industriel, économique) de l'État moderne.

⁴³ (Pestre, 1984) montre l'attachement des physiciens de l'entre-deux-guerres à la « science pure », à une forme de scientisme et de « désintéressement ».

⁴⁴ Nous renvoyons au texte de L. Petitgirard dans ce dossier pour comprendre le rôle du Cnam dans les transformations des années 1960, comme lieu de convergence organisationnelle, qui semblait impossible à trouver auparavant.

Bibliographie

Alder, K. (1995). « A Revolution to Measure – The Political Economy of the Metric System in France. » In Wise, N. (éd.) *The Values of Precision*. Princeton (N.J.): Princeton University Press, pp. 39-71.

Alder, K. (2005). *Mesurer le monde: 1792-1799*. Paris: Flammarion.

Baker, K. M. (1975). *Condorcet: from Natural Philosophy to Social Mathematics*. Chicago: Chicago University Press.

Belhoste, B. (1994). « Henri Tresca (1814-1885). Professeur de mécanique appliquée (1874-1885). ». In Fontanon, C. et Grelon, A. (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris: INRP/Cnam (Collection Histoire biographique de l'enseignement, 2 volumes), pp. 624-632.

Bernard, M.-Y. (1994). *Le Conservatoire national des arts et métiers: vers le xx^e siècle*. Paris: Eyrolles, DL 1994.

Bigourdan, G. (1901). *Le Système Métrique Des Poids et Mesures: Son Établissement et Sa Propagation Graduelle*. Paris: Gauthier-Villars.

Buchwald, J. Z. (1996). *Scientific Credibility and Technical Standards in 19th and Early 20th Century Germany and Britain*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Cahan, D. (1982). « Werner Siemens and the Origin of the Physikalisch-Technische Reichsanstalt, 1872-1887. » *Historical Studies in the Physical Sciences* 12 (2), pp. 253-83.

Cahan, D. (1989). *An Institute for an Empire: the Physikalisch-Technische Reichsanstalt (1871-1918)*. Cambridge: Cambridge University Press.

Caron, F. et Cardot, F. (dir.) (1991). *Histoire générale de l'électricité en France*. Paris: Fayard.

Condorcet, J. A. N. (1794). *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain. Ouvrage posthume de Condorcet*. Paris: Agasse, An III.

Constant, B. (1813). *De L'esprit de Conquête et de L'usurpation Dans Leurs Rapports Avec La Civilisation Européenne*. Paris: Ficker, 1813 (édition 1914).

Fleury, P. (1935). *Généralités sur les mesures*. Paris: Hermann, 1935.

Fleury, P. (1938). *Leçons de métrologie générale et appliquée*, Paris: Hermann, 1938.

Fontanon, C. (1994). « Arthur Morin (1794-1880). Professeur de mécanique appliquée à l'industrie (1839-1854). Directeur (1849-1880). » In Fontanon, C. et Grelon, A. (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris: INRP/Cnam (Collection Histoire biographique de l'enseignement, 2 volumes), pp. 311-322.

Fontanon, C. (1998). « Le Conservatoire national des arts et métiers (1794-1920). » In Bergeron, L., Bourdelais, P. (dir.), *La France n'est-elle pas douée pour l'industrie?* Paris: Belin, pp. 275-304.

Garnier, B. et Hocquet, J.-C. (éds.) (1990). *Genèse et diffusion du système métrique*. Caen: Diffusion du Lys.

Gooday, G. (1990). « Precision Measurement and the Genesis of Physics Teaching Laboratories in Victorian Britain. » *The British Journal for the History of Science* 23 (01), pp. 25-51.

Guedj, D. (2000). *Le mètre du monde*. Paris: Seuil.

- Joerges, B. et Shinn, T. (2001). *Instrumentation: Between Science, State and Industry*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Legendre, A.-M., Coquebert de Montbret, C.-E. et Gattey, F. (1795). *L'agence temporaire des poids et mesures aux artistes et aux amateurs éclairés des arts*. Paris.
- Le Moël, M., Saint-Paul, R. et Fontanon, C. (éd.) (1994). *Le Conservatoire national des arts et métiers au cœur de Paris, 1794-1994*. Paris: Conservatoire national des arts et métiers/Délégation à l'action artistique.
- Marquet, L. (1975). « La convention du Mètre. » *Bulletin du Bureau national de métrologie*, n° 20, avril 1975, pp. 5-9.
- Marquet, L., Le Bouch, A. et Roussel, Y. (1997). *Le système métrique, hier et aujourd'hui*. Amiens: Association pour le développement de la culture scientifique, DL 1997.
- Mathieu, J.-P. (1994). « Pierre Fleury (1894-1976). Professeur de métrologie; Professeur de Physique générale dans ses rapports à l'industrie (1936-1964). » In Fontanon, C. et Grelon, A. (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris: INRP/Cnam (Collection Histoire biographique de l'enseignement, 2 volumes), pp. 510-515.
- Moreau, H. (1975). *Le système métrique: des anciennes mesures au système international d'unités*. Paris: Chiron.
- Morin, A. (1870a). « Notice historique sur le système métrique, sur ses développements et sur sa propagation. » *Annales du Conservatoire des arts et métiers* – 1^{re} série, tome IX, 1870-1872, pp. 573-640.
- Morin, A. (1870b). « Rapport au ministre de l'Agriculture et du Commerce sur la révision des étalons du bureau de vérification des poids et mesures. » *Annales du Conservatoire des arts et métiers* – 1^{re} série, tome IX, 1870-1872, pp. 5-64.
- Olesko, K. M. (1991). *Physics as a Calling: Discipline and Practice in the Königsberg Seminar for Physics*. Ithaca: Cornell University Press.
- Pestre, D. (1984). *Physique et physiciens en France, 1918-1940*. Paris: Archives Contemporaines, 1984 (2^e édition 1992).
- Prieur, C.-A. (1795). *Rapport fait au nom du Comité d'instruction publique, sur la nécessité et les moyens d'introduire dans toute la République les nouveaux poids et mesures précédemment décrétés*. Par C. A. Prieur. Imprimés par ordre de la Convention nationale. Paris: Imprimerie nationale.
- Rasmussen, A. (1989). « Les Congrès internationaux liés aux Expositions Universelles de Paris (1867-1900). » *Cahiers Georges Sorel* 7 (1), pp. 23-44.
- Schiavon, M. (2014). *Itinéraires de la précision: géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments de précision en France*. Nancy, France: PUN-Éditions universitaires de Lorraine.
- Smith, C. et Wise, N. (1989). *Energy and Empire: a Biographical Study of Lord Kelvin*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tunbridge, P. (1992). « Lord Kelvin: his influence on electrical measurements and units. » *History of Technology* 18. London: Peter Peregrinus Ltd.
- Wise, N. (1995). *The Values of Precision*. Princeton: Princeton University Press.

Le Cnam et la restructuration de la Métrologie française dans les années 1960

Loïc Petitgirard
HT2S, Cnam.

Résumé

La structure métrologique nationale élaborée dans les années 1960 est le résultat d'un processus complexe créant la première Chaire de métrologie au Cnam en 1967, l'Institut national de métrologie (INM, au Cnam) en 1968, et le Bureau national de métrologie en 1969. Cet article vise à montrer le contexte et la dynamique de cette restructuration, découpée en trois phases principales, et le rôle pluriel du Cnam dans ce processus. Nous montrons qu'à travers la crise de son Laboratoire d'essais (LNE), le Cnam est initiateur des projets de réorganisation (1964-67), qui prennent une ampleur nationale quand les outils de la politique scientifique gaullienne s'emparent du sujet et instaurent le BNM comme coordinateur national (1967-69). L'article s'achève sur le processus d'autonomisation du LNE (1970-78) et ses conséquences sur l'institution Cnam.

Introduction

L'organisation de la métrologie en France a connu plusieurs mutations depuis l'adoption en l'an III, par décret de la Convention, du Système métrique et de l'instauration de la première Agence temporaire des poids et mesures, en 1795. Le tournant pris dans les années 1960 marque une recomposition de la Métrologie française, et compte parmi les étapes clés de cette histoire. Concernant très directement le Cnam, la Chaire de métrologie est créée en 1967 et l'Institut national de métrologie (INM), au sein du Cnam, se dessine dans la foulée (1968-69). Au niveau national, le Bureau national de métrologie (BNM) est créé en 1969, en charge de la coordination et de l'organisation des acteurs de la métrologie. Cette phase est d'autant plus importante qu'elle a engagé la structuration de la Métrologie française pendant 35 ans, jusqu'à la redéfinition du BNM en 1994.

Lorsque s'échafaude la nouvelle structure dans les années 1960, la métrologie, dans d'autres pays développés,

est déjà très organisée et souvent pilotée à l'échelle nationale par une agence unique : aux États-Unis, le National Bureau of Standards (NBS)¹ a été créé en 1901 ; en Allemagne, le Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR²), créé en 1887, a concentré progressivement les prérogatives métrologiques ; au Royaume-Uni, est installé le National Physical Laboratory (NPL) depuis 1900.

Ce décalage par rapport aux autres organisations nationales pose question : pourquoi a-t-on attendu en France les années 1960 pour aboutir à une organisation à cette échelle ? Nous allons voir que la création d'un Bureau national clôt plusieurs décennies de débats, de propositions et de tentatives avortées³. La

réalité de la construction de cette solution BNM est complexe et très significative de l'évolution du système économique, industriel et universitaire sous la présidence de Charles de Gaulle. Le BNM est une solution singulière, *ad hoc*, sans équivalent dans d'autres pays. Il était attendu, 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 l'élaboration du BNM et des nouvelles structures, le Cnam a joué un rôle pluriel. Il a pour lui le poids de l'histoire, une relation de longue durée avec la métrologie⁴. Le Cnam dans les années 1960 est aussi, et surtout, constitué du Laboratoire national d'essais (LNE), laboratoire qui réalise des étalonnages et des essais pour la recherche et l'industrie française. Le Cnam a de fait une tutelle sur une partie de la Métrologie française.

La création du Laboratoire d'essais 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

1 Il est devenu le NIST (National Institute of Standards and Technology) en 1988.

2 C'est aujourd'hui le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

3 Pour un rappel historique de ces débats, nous renvoyons à l'article de C. Fontanon et L. Petitgirard dans ce dossier (abordant notamment la création du Laboratoire des machines de Morin et Tresca, du Laboratoire d'essais en 1900 et les tentatives de structuration déjà au XIX^e siècle). Pour une vision des rapports entre recherche et industrie, la période 1880-1940, voir : (Shinn, 1980). Sur les questions de métrologie électrique et rapports aux industries, voir en particulier (Soubrier, 1918), (Blondel, 1990) et (Caron, 1991). Sur la métrologie liée à l'émergence de la radioactivité, voir tout particulièrement l'ouvrage consacré à Marie Curie et son laboratoire : (Boudia, 2001). Notons que, parmi les anciens acteurs et responsables de la métrologie, circule l'hypothèse suivante, qui paraît trop limitée : les « décideurs » ont longtemps pris pour acquis que le BIPM étant à Sèvres, sur le territoire français, il n'y avait pas lieu de construire un laboratoire national (Bernard, 1994). Entretiens de l'auteur avec André Allisy (décembre 2012) et avec Laurent Citti (11 décembre 2014).

4 Sur cette longue histoire, voir l'article de C. Fontanon et L. Petitgirard dans ce dossier.

électriciens seront assurés par le Laboratoire central d'électricité (LCE). Et l'entrée du Laboratoire dans le giron du Cnam est, dès le départ, problématique et conflictuelle (Schiavon, 2014). Précisons également que le Laboratoire est « national » parce que le Conservatoire devient « national » avec la réforme de 1900 : l'usage a imposé le sigle LNE pour « Laboratoire national d'essais », nous utiliserons alternativement LNE ou Laboratoire d'essais. Cela signifie également qu'il n'a pas eu nécessairement des missions nationales, fixées par le gouvernement, et explique la création d'autres laboratoires métrologiques.

L'histoire du LNE et des relations avec le Cnam, avant et après la période gaullienne, est encore à écrire, mais elle est heurtée, conflictuelle, compliquée. Le problème de la définition de ses missions, tout particulièrement, est l'objet 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 de base, scientifique, sur les références ? Les tourments des relations entre le LNE et le Cnam, les changements successifs de position sur les missions du laboratoire, sont une partie de l'explication du décalage par rapport à d'autres pays développés, perçu dans les années 1960.

Cet article vise à préciser le contexte, les débats, les pressions qui ont fait émerger la structure métrologique nationale dans les années 1960 : nous

voulons montrer, au moins partiellement, pourquoi et comment s'élabore la nouvelle structure, analyser les raisons des acteurs engagés et le processus complexe de décision qui amène au BNM en 1969. Il s'agit également de nous focaliser sur le rôle du Cnam et de plusieurs acteurs clés du système. Car, cette organisation est tout autant une demande d'en haut, de scientifiques engagés dans la définition de politique scientifique et technologique souhaitée par de Gaulle (Bonneuil, 2005), que d'acteurs et d'opérateurs du terrain de la métrologie.

Pour révéler toutes les facettes de la restructuration nous la présentons comme une succession de plusieurs phases, qui peuvent se chevaucher chronologiquement car elles ne se jouent pas toutes aux mêmes échelles ni dans les mêmes lieux. La première phase, et première partie de cet article, correspond au développement 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 consultations produites, est un temps essentiel dans l'ensemble de la restructuration nationale : ce temps se déroule au Cnam, et si le diagnostic est focalisé au départ sur le LNE, c'est à cette occasion que les discussions et négociations sur la réorganisation nationale sont engagées.

La seconde phase renvoie aux actions inter-organismes et inter-ministérielles pour élaborer un plan national pour la métrologie (1964-67) : le plan démarre

à l'occasion de la crise du LNE, il se développe sur commande de la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) souhaitant connaître les ressources en matière de métrologie à l'échelle nationale, et il aboutit au premier projet de BNM. La troisième phase est la mise en place effective de cette solution : des enquêtes de terrain (1968-69) aux transformations des organisations, c'est un retour aux acteurs, un passage des intentions aux réalités des organisations et à ses complexités (1970-78). Nous bornons cette histoire de la restructuration nationale à la séparation entre le LNE (transformé en Établissement public à caractère industriel et commercial) et le Cnam, officialisée en 1978 et nous concluons sur le paysage de la métrologie nouvellement réorganisée.

Crises et impasses au Laboratoire d'essais

La crise que traverse le LNE sur la période 1960-69 a des racines profondes et elle est 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 LNE⁵.

⁵ Voir notamment : (De Monzie, 1948), (Bernard, 1994) et la notice sur George-Albert Boutry dans le *Dictionnaire des professeurs du Cnam* (Fontanon, 1994). (Schiavon, 2014, chapitre IV) donne un compte rendu rigoureux et actualisé du moment de création du Laboratoire.

Un laboratoire en crise récurrente ?

Le Laboratoire est créé au tournant de 1900 dans un contexte où le scientifique se mêle au politique, sur fond d'exposition universelle à venir, en 1900, et d'une question de prestige national, de rayonnement scientifique et technique de la France. La Société des ingénieurs civils souhaite revivifier le Laboratoire d'essais des machines, construit par Arthur Morin et Henri Tresca, en 1851-1852. Fermé en 1880, faute de moyens, ce Laboratoire avait connu un succès tant chez les industriels, les ingénieurs que les savants, et participait à l'aura du Conservatoire. Le projet des ingénieurs civils est rival du LCE (Laboratoire central d'électricité) qui a été institué en 1882. Les ingénieurs civils obtiennent gain de cause, et le Laboratoire doit être placé au Conservatoire. Mais une question reste en suspens : quelles missions ce Laboratoire doit-il remplir ? De 1900 jusqu'à la crise des années 1960, la réponse à cette question a changé plusieurs fois et les tensions naissent précisément entre des acteurs incapables de s'accorder sur ces missions.

Martina Schiavon a décrit l'imbricatio lié à la création du LE, dans lequel l'acteur principal est Gaston Louis Hartmann (1851-1922). Il entre dans cette histoire bien avant que le Laboratoire ouvre ses portes : délégué par Alexandre Millerand, il agit en qualité de chef du Bureau national scientifique et permanent des poids et mesures (créé en 1880 à l'occasion des grandes ma-

nœuvres autour du BIPM et sa section française) pour dessiner le Laboratoire. Hartmann a plusieurs ambitions, celle d'uniformiser les mesures dans les industries civiles et militaires, et plus personnellement, de généraliser l'emploi de ses inventions dans toute l'industrie⁶. Il agit activement pour créer un laboratoire adéquat à ce projet, tout en ayant à l'esprit les succès du Laboratoire de Morin et Tresca. Soulignons aussi que le Conservatoire a des rapports privilégiés au militaire, et à l'École polytechnique, et qu'Hartmann est membre du conseil d'administration du Conservatoire. La rencontre d'intérêts avec le projet des ingénieurs civils conduira à instaurer le LE au Conservatoire.

Avec l'esquisse du premier projet pour le LE, arrive l'opposition ferme des physiciens Eleuthère Mascart et Jules Violle. Pour défendre son projet Hartmann fait un rapport sur la situation à l'étranger, avec les yeux rivés sur les réalisations allemandes au sein du PTR⁷. Celui-ci est or-

ganisé par un programme défini selon les besoins de la science et de l'industrie, et délivre en particulier les procès-verbaux d'essais pour les industriels: Hartmann préjuge que ce service est le seul indispensable⁸. En cela, il s'oppose à ceux qui n'imaginent pas un service aux industries sans un travail de métrologie scientifique, sur les références et la conservation des étalons. Au sein du Conservatoire, Mascart appuie la candidature du physicien Alfred Pérot⁹ (1863-1925) à la direction du Laboratoire en 1901. Mais cette voie de la métrologie, appuyée par des recherches en optique, c'est précisément tout ce qu'Hartmann veut éviter¹⁰.

Malgré cette opposition, Pérot est nommé directeur du Laboratoire par le conseil d'administration du Cnam. Hartmann démissionne de la commis-

⁶ Hartmann, polytechnicien (X-1872), officier d'artillerie, est l'inventeur d'un comparateur-enregistreur (vers 1891) qui lui vaut une réputation importante au BIPM et à la Commission française du mètre. Son instrument permet de contrôler des objets à partir du mètre-étalon. Hartmann est directeur de l'Atelier de précision, à partir de 1891, et c'est là qu'il conçoit le comparateur. Le physicien Alfred Cornu le fait connaître à l'Académie des sciences (Schiavon, 2014, pp. 245-46).

⁷ L'activité métrologique est en plein essor au PTR (Cahan, 1989). Le seul titre du rapport de Hartmann publié en 1901 est éloquent: *Annales du Cnam*, 1901, 3^e série, Tome III, « Rapport de la commission d'enquête sur les laboratoires officiels d'essai de Berlin, Munich, Dresde, Vienne et Prague », pp. 93-162.

⁸ « ... Nous le répétons, il faut des laboratoires d'essais véritables, des laboratoires destinés aux essais dont le public a besoin, et non des laboratoires de recherches scientifiques où l'argent de service ne servira qu'à acheter un matériel destiné à des expériences scientifiques imaginées par un théoricien. Personnel et matériel ne devant pouvoir servir qu'aux essais industriels, l'un et l'autre devant être choisis en vue de cette fin très précise seule. » (Hartmann, 1901, pp. 806-809). Précisons que le texte en question n'est pas explicitement signé Hartmann, mais de manière énigmatique il est signé « Z. »: le texte rentre dans de nombreux détails de l'enquête, il est polarisé par le PTR et à travers les conclusions qu'il dresse, il n'y a que peu de doutes sur l'auteur.

⁹ Polytechnicien, physicien, spécialiste d'optique, inventeur avec Charles Fabry de l'interféromètre Fabry-Pérot, un instrument essentiel dans les mesures physiques: il représente une spécialité française de la mesure de précision, avec des physiciens attachés à développer leur propre instrumentation.

¹⁰ Pour plus de détails sur Pérot, ses travaux, les opticiens français, nous renvoyons à (Schiavon, 2014).

sion (mais reste au conseil d'administration du Cnam), en protestation. Ce n'est que le début des tensions, qui conduiront Pérot à démissionner en 1907¹¹. Les chefs de section du LE sont en désaccord avec Pérot, en particulier dans le type de relations à établir avec les industriels : ils souhaitent construire une relation de service d'expertise, plus proche des intérêts industriels et qui serait rentable. Le successeur de Pérot sera le capitaine Ferdinand Cellier, adoubé par Hartmann, et qui cantonnera le Laboratoire dans les essais et contrôles pour l'industrie (De Monzie, 1948, pp. 107-120). Ainsi se conclut une première période très conflictuelle, avec beaucoup de tensions internes au Cnam, et surtout une absence de projet pour ce laboratoire.

Le LNE se trouve à un nouveau carrefour de son histoire dans les années 1930. Jules Lemoine, professeur de physique au Cnam, et par ailleurs directeur de l'École supérieure des poids et mesures¹², obtient que Pierre Fleury vienne donner les premiers cours de métrologie au Cnam (voir ci-dessous). C'est un élève de Fleury, George-Albert Boutry (1904-1983) qui, au sortir de sa thèse, prendra en charge la direction du LE, succédant à Cellier en 1936. En mission de

rénovation du LE, Boutry développe un projet privilégiant la métrologie primaire du fait que la mission de conservation des étalons devient effective et importante pour le Cnam et le LE. Et sans perdre de vue la mission de service à l'industrie qui doit aussi être celle du LE¹³.

La ligne de Boutry ne fait cependant pas l'unanimité, il se trouve face à des conceptions différentes des missions du LE, au sein même du Cnam. La situation de 1900-07 semble se rejouer¹⁴. Par ailleurs, le problème des moyens est récurrent, malgré, ou à cause de, la construction du nouveau bâtiment, rue Gaston-Boissier : cette construction promet d'apporter des

13 Il s'exprime ainsi en 1938 : « *L'usine et l'atelier ont besoin d'appareils de mesure capables d'une extrême précision. Il est nécessaire de contrôler ou de vérifier périodiquement le fonctionnement et les propriétés de ces appareils. Il doit donc exister, dans la Nation, un organisme central capable de réaliser des étalons de mesure définis sans ambiguïté avec une précision supérieure à l'incertitude la plus petite de la mesure dans l'industrie ; cet organisme doit aussi disposer de méthodes de mesure qui garantissent une précision supérieure à celle dont sont capables les appareils à vérifier eux-mêmes. Ainsi les USA disposent du National Bureau of Standards, la Grande-Bretagne du National Physical Laboratory, l'Allemagne du Physikalisch-Technische Reichsanstalt* », in (Fontanon, 1994), notice de George-Albert Boutry.

14 En 1949, à l'heure de désigner le successeur de Boutry, Albert Métral, professeur au Cnam, rédige une lettre à l'adresse du président du conseil d'administration du Cnam, l'amiral Lucien Lacaze, pour soutenir la candidature de Louis Longchambon, qu'il considère comme un futur directeur excellent. Ce faisant, il critique la gestion de George-Albert Boutry, qu'il estime coupable d'avoir transformé un laboratoire d'essais en laboratoire de recherches ne faisant plus assez d'essais. Et il tacle également la candidature de Maurice Bellier, qu'il juge déplacée étant donné son curriculum [Archives du Cnam, Dossier Maurice Bellier, Candidature au LNE].

11 Il faudrait plutôt dire qu'il est destitué, et qu'il poursuivra sa carrière à l'École polytechnique et à l'Observatoire.

12 Cette école est dénommée aujourd'hui « École supérieure de métrologie », créée par décret en 1929. Elle forme les agents du Service des instruments de mesure (anciennement Service des poids et mesures), c'est-à-dire les agents de la métrologie légale.

équipements de pointe au Laboratoire, mais il grève le budget du LE pour de nombreuses années (nous le verrons à l'occasion de la crise financière du Laboratoire dans les années 1960). Ce cumul de problèmes conduit Boutry à démissionner de la direction du LE en 1949. Maurice Bellier lui succède à la direction de ce laboratoire qui a son siège (dans le xv^e arrondissement) très excentré du Cnam de la rue Saint-Martin.

La crise des années 1960

Héritage de cette histoire, la crise des années 1960 est à la fois interne, faite de tensions avec la tutelle du Cnam, et externe du fait que le LNE ne peut plus répondre aux besoins des laboratoires et industriels demandant des essais. Dès 1960, le LNE est confronté à l'amplification de quatre problèmes qui obscurcissent son horizon, et conduisent à la demande d'un rapport complet sur l'état et les fonctions du Laboratoire.

Premier problème, les travaux demandés au LNE concernent un nombre impressionnant de domaines, divers et variés : 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 (en aéronautique avec Henri Girerd, en chimie des plastiques avec Dubois¹⁵), mais force est de constater que le spectre d'intervention est trop large pour un seul laboratoire, malgré les plus de 200 personnes qui y travaillent. Il y a une conséquence majeure à ce cumul : toute l'activité du Laboratoire est concentrée sur les tâches d'essais, alors que la métrologie scientifique, avec les recherches sur les étalons par exemple, est devenue inexistante¹⁶.

Simultanément, second problème, les essais sont devenus pour une part croissante d'entre eux, 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. La non-clarification de ses missions explique en partie cela. En outre, le contexte du développement technique et industriel post-seconde guerre mondiale, contraint ponctuellement le LNE à demander des prestations extérieures en recherche et développement pour compenser ses carences : cela pèsera parfois lourd dans le budget global.

Troisième problème, le LNE est identifié comme le correspondant natio-

¹⁵ Rapport d'activité 1961-62 du Cnam par Louis Ragey (présenté en avril 1963) [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1963].

¹⁶ En moyenne, on dénombre 4 publications par an, sur la période 1960-65 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1961-66]. Rapports d'activité du LNE et du Cnam présentés au conseil d'administration.

nal du BIPM, devant assurer également la conservation des étalons nationaux¹⁷. Or, par la force des choses, 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 déplorer¹⁸.

Le quatrième problème est celui des contrôles légaux que doit assurer le LNE, tout particulièrement celui des alcoolomètres et des thermomètres médicaux. La vérification était facultative avant le décret du 14 août 1918, qui a rendu ces contrôles obligatoires. Les contrôles étaient réalisés dans le service du ministère du Commerce et de l'Industrie, et ce service a été intégré dans le LNE, avec un développement continu et important¹⁹. Le principal problème tient au fait que les contrôles ne sont pas rentables au prix qui est reversé au Laboratoire²⁰. 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 tests sont largement automatisés, mais la logistique mobilisée, le personnel nécessaire sont disproportionnés pour un laboratoire comme le LNE²¹.

La crise financière du LNE est une conséquence de cette série de problèmes latents et jamais pris à bras-le-corps. Sur la période 1950-61, les recettes ont augmenté 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, et malgré la croissance de son activité, le LNE est déficitaire, et il est le seul laboratoire du Cnam dans cette situation (ce qui oblige même à puiser dans le fonds de réserve).

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 équipe-

17 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 étalons au Cnam.

18 Le président du BIPM, Jean Terrien, le redira, plusieurs fois, très directement et sans détour, au sein du groupe de travail du Cnam de 1967.

19 Eleuthère Mascart (1837-1908) avait organisé le premier Bureau de vérification des alcoolomètres et densimètres en 1883 et l'a fait transférer au Cnam: il est aussi un des instigateurs du LNE à ses premières heures (Schiavon, 2014, p. 289). Avec un peu d'ironie, il considérait que la question des thermomètres n'était pas seulement une question de construction d'instruments de précision, mais nécessaire à la santé publique et qu'il fallait, en conséquence, procéder à leur vérification.

20 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1964.] 90 % des revenus de ces contrôles sont prélevés par l'État.

21 Ce que n'a pas manqué de souligner M.-Y. Bernard avec beaucoup d'ironie, voire de condescendance à l'égard de ces travaux, dans son livre *Le Cnam au xx^e siècle* (Bernard, 1994, p. 64)!

ments 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.

La situation du LNE est somme toute assez 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'essais au LNE, émanant d'industriels ou d'autres laboratoires est tellement importante que le LNE ne peut pas suivre : il lui faudrait plus de personnel. Maurice Bellier avance le chiffre de 350 salariés nécessaires pour suivre la cadence, contre les 200-230 dont il dispose en 1964²². 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. Il a une fonction tout à fait reconnue. 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, est le changement de statut du LNE²³ : lui donner de l'autonomie, en faire un EPIC (Établissement public à caractère industriel et commercial), c'est la seule issue perçue par beaucoup d'acteurs. Mais ce changement est refusé par le ministère des Finances²⁴, qui suggère qu'il soit transformé en institut du Cnam. Or, dans les faits, le budget du LNE est toujours distingué du reste du budget du Cnam, il est quasiment un institut : l'officialiser changerait peu de chose à l'état de fait.

La question des rémunérations est un point revenant régulièrement à l'ordre du jour. Il est envisagé d'assouplir les règles de rémunération, mais cela ne peut concerner que le personnel contractuel, peu nombreux en réalité, et non les fonctionnaires et cadres administratifs dont les rémunérations sont fixées par ailleurs.

En tout état de cause, ce ne sont donc que quelques symptômes qui peuvent être traités, pas le problème de fond. L'échec de ces propositions successives, ou leur non-application, conduit à une mise à plat du dossier en 1964.

²³ Boutry l'avait demandé en 1949, avant de démissionner. (Fontanon, 1994), notice biographique sur George-Albert Boutry. Boutry est présent lui-même au conseil d'administration en 1964, et il fait clairement rappeler cet état de fait [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1964].

²⁴ Plusieurs fois, et malgré des appuis importants comme M. Jeanneney [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 27 avril 1962].

²² [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1961-67.]

Le rapport de 1964 sur les missions et moyens du LNE : de l'échelle du Cnam à l'échelle nationale.

Sur fond de crise, s'organise un groupe de travail qui se réunira en 5 séances sur l'année 1964, avec les personnalités suivantes : Pierre Fleury, Maurice Bellier (en tant que directeur du LNE), Louis Ragey (directeur du Cnam), Pierre Salmon (ingénieur général), Léon Denivelle (professeur au Cnam), Jean Debiesse (directeur du Centre d'études nucléaire de Saclay – CEA), Jean Terrien (directeur du BIPM), Paul Guérin (secrétaire du groupe de travail, directeur adjoint du Cnam). Ainsi, démarre l'analyse approfondie du LNE visant à proposer des mesures pour que le LNE « rende le service demandé »²⁵. Et qui, au final, c'est ce que nous allons montrer, dépasse le cadre du Cnam : il s'agit d'un moment fondateur de la redynamisation de la métrologie en France.

Un comité au fait des problématiques métrologiques

Dans ce comité, il y a des personnalités clés de la métrologie (Terrien, Fleury, Bellier), le directeur du Cnam Louis Ragey (et son directeur adjoint, qui sera également son successeur en 1965, Paul Guérin). Léon Denivelle est le professeur titulaire de la Chaire de chimie tinctoriale

(1941-74)²⁶ : c'est un industriel et un chercheur de premier plan en chimie, un expert très recherché et un conseiller scientifique de multiples sociétés industrielles. Il a contribué à organiser le CEA en 1945, en étant conseiller scientifique du chef d'état-major de l'armée (novembre 1944), il a donc également une expérience de long terme avec le secteur de la défense. Et il a des responsabilités en matière de politique scientifique nationale. Son expertise n'est pas strictement de l'ordre de la métrologie, mais c'est un expert de l'articulation des problématiques scientifique, technique, politique et militaire, ce qui est précisément en jeu en 1964 avec la métrologie.

Pierre Salmon (1896-1981), quant à lui, est ingénieur général de l'armement, polytechnicien (X 1919), il est l'auteur d'un livre sur la *Métrologie industrielle* (1956)²⁷. Jean Debiesse (1907-1978) est un physicien, alors directeur du CEN Saclay, au sein du CEA (il le restera sur la période 1954-70) : notons qu'il sera le premier président du Bureau national de métrologie après sa création, en 1970. Les deux personnalités vraiment extérieures,

25 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1964, p. 88.]

26 Toutes les informations relatives à L. Denivelle se trouvent dans sa biographie, in (Fontanon, 1994, pp. 395-402). Denivelle a été nommé professeur au Cnam en 1941. Il a une activité très importante en chimie des textiles et macromolécules, une activité industrielle et de recherche continue. Il a été président de la Société de chimie industrielle, administrateur de groupes industriels comme Rhône-Poulenc, a participé au 2^e et 3^e Plan relatif à la Chimie, membre du Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique (1954), dans les comités du Cnrs, pour ne citer que quelques-unes de ses attributions.

27 (Salmon, 1956.)

Terrien et Debiesse, du fait de leur position (BIPM et CEA) au moment du groupe de travail, sont tout à fait essentielles pour comprendre la nature de la dynamique qui va se mettre en place.

On saisit déjà à travers les membres de cette commission que le secteur militaire, et le CEA en particulier, est particulièrement actif pour l'organisation de la Métrologie française dans son ensemble, et vigilant à ce que ses intérêts soient servis.

Un bilan sans concession

Que contient le rapport présenté au conseil d'administration du Cnam au final²⁸ ? En substance, il reprend beaucoup des points précédemment mentionnés (abordés au fil des conseils d'administration du début des années 1960), de manière synthétique et sans concession. Le groupe de travail insiste sur la trop grande dispersion du Laboratoire (qui accepte « tout »), qui gaspille son temps. Au contraire, il faudrait sélectionner, passer des conventions, décentraliser, à l'image de la délégation des références des grands électriques au LCIE (Laboratoire central des industries électriques) signée en 1943²⁹.

²⁸ [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – Annexe, 1964, pp. 88-97.]

²⁹ Le LCIE est réorganisé en 1942 sur la base du LCE (Laboratoire central d'électricité). Le LCIE a une vie et un développement tout à fait autonome du Cnam, en symbiose avec l'industrie électrique. Voir (Caron, 1991) et (Erard, 1995).

La facturation est inférieure aux coûts réels de la structure alors que la rentabilité pourrait être considérablement améliorée. Le LNE peine à conserver un personnel de qualité, avec le problème de la rémunération des agents largement insuffisante, et malgré les tentatives de « défonctionnariser »³⁰. Les ressources budgétaires par agent sont également trop faibles : 20 000 francs au LNE contre le double, voire le triple, au NPL ou NBS. La contribution de l'État est « seulement » de 50 % au LNE, alors qu'elle est bien plus forte au Royaume-Uni (89 %) ou aux États-Unis (96 %).

Ces constatations ont conduit le groupe de travail à considérer que l'équilibre financier ne pouvait être recherché pour l'ensemble du Laboratoire national d'essais. Si la rentabilité peut être totale dans certains secteurs, elle sera nulle ou presque dans d'autres domaines comme celui de la métrologie. C'est ainsi que s'est précisée l'idée d'un cloisonnement budgétaire et de la division du Laboratoire en secteurs différenciés ayant chacun leur budget propre.³¹

La question budgétaire est le sujet de préoccupation initial, le rapport fait un bilan clair sur ce point. Mais la réponse apportée et les préconisations qui suivront ne sont pas qu'une question de rééquilibrage de masses budgétaires, c'est ce qui se dessine et qui fait la portée du rapport. Car la question centrale, en définitive, est celle de l'articulation entre les

³⁰ La comparaison vaut avec l'industrie, mais aussi le CEA, où les agents sont payés 80 % de plus !

³¹ Souligné dans le texte original.

missions incombant jusqu'alors au LNE, entre les services (essais et contrôles) et la métrologie scientifique, tout particulièrement. Jean Terrien explicite clairement cette double perspective dans le compte rendu au conseil d'administration du Cnam :

[...] le rôle d'un laboratoire national de métrologie n'est pas seulement de fournir à l'industrie et à la recherche les étalons de mesure les plus exacts et les plus précis; tâche que l'on désigne communément par l'appellation un peu impropre de « conservation des étalons ». Il doit être un centre de recherche scientifique orienté vers le perfectionnement de ces étalons qui est imposé à la fois par la précision croissante que réclament l'industrie et la recherche et par les possibilités nouvelles offertes par le développement scientifique. Cette recherche se fait en coopération avec l'aide des comités consultatifs auprès du Comité international des poids et mesures. Or, la contribution de la France au travail international a été presque inexistante au cours des dernières années. Sur 94 documents publiés entre 1958 et 1963, trois seulement sont imputables à notre pays dont aucun au Laboratoire d'essais. Il y a là une carence grave, extrêmement dommageable pour le prestige de la France, créatrice du Système métrique.

Le LNE est le sujet de l'audit, le point de départ des discussions du groupe, mais le groupe de travail entame déjà une réflexion sur la réorganisation possible d'une partie beaucoup plus large de la métrologie nationale. Concernant le LNE, la modification structurelle préconisée, pour mieux assurer ses missions, serait un changement profond qui se résume

dans la dénomination suggérée par les rapporteurs: le LNE pourrait prendre le titre d'« Institut national de métrologie, mesures et essais ».

Il deviendrait un institut du Conservatoire et resterait attaché par cet intermédiaire au ministère de l'Éducation nationale. Un lien serait établi également avec le ministère de l'Industrie et le ministère d'état chargé de la Recherche scientifique. Ainsi serait précisée sa triple vocation: institut scientifique, organisme de recherche, laboratoire d'essais et de contrôle. [...]

L'Institut serait doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière. Pour lui donner une plus grande souplesse de fonctionnement et lui permettre de répondre aux exigences d'une clientèle industrielle, il recevrait le statut d'établissement scientifique public à caractère industriel.

Ces pistes nous renvoient très directement aux points durs de toute l'histoire du LNE, à cheval entre plusieurs missions, plusieurs ministères, au statut administratif sans cesse débattu. Prenant en compte la crise financière et budgétaire, le groupe de travail préconise une redéfinition des modes de financement du Laboratoire, qui correspondrait au découpage en quatre (sous-) laboratoires.

À l'image des laboratoires équivalents à l'étranger, le budget du Laboratoire serait constitué des subventions de l'État, reçues par le canal du Cnam; de subventions du CEA concernant les activités de métrologie nucléaire; et des produits des essais

et contrôles réalisés, et 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.

Précisons les choix sous-jacents à ce nouveau découpage. Le Laboratoire de métrologie générale emploierait 40 à 50 personnes et deviendrait le correspondant direct du BIPM, celui qui manque pour représenter la France. Les recherches concerneraient le perfectionnement des étalons, la métrologie dimensionnelle, avec pour ambition de faire réapparaître la France dans la compétition internationale. Il serait entièrement subventionné par l'État. La perspective est tout à fait à l'image des réorganisations des secteurs scientifiques et techniques stratégiques des années 1960.

Le Laboratoire de métrologie nucléaire regrouperait 40 personnes environ, travaillant à la préparation et au contrôle des étalons radioactifs. Pour l'essentiel, il s'agit d'un projet de fusion, de regroupement des activités du LNE et de celle du Centre d'études nucléaires du CEA à Saclay. Ce qui explique l'idée d'un financement à 80 % par le CEA, complété par les produits des ventes de sources radioactives. Il y a là l'affichage d'un effort de rassemblement et mise en cohérence des forces, somme toute peu nombreuses, dans le domaine.

Le Laboratoire d'essais et mesures rassemblerait 80 à 90 personnes, et regrouperait les sections les plus actives et mieux équipées du LNE de 1964: essais mécaniques, machines, thermique, acoustique, poussière et aérosols. La question de la poursuite des activités en chimie demande à être étudiée, et d'autres sections pourraient ouvrir en cas de besoin. De par la nature des activités de cette section, elle devrait vivre sur ses propres ressources, sans subventions.

Enfin le Laboratoire des contrôles légaux et estampillages regrouperait 40 personnes, dédiées aux contrôles imposés par la loi française (dont les thermomètres médicaux qui mobilisent beaucoup de ressources). Cette activité trouverait son financement courant dans les taxes de perception reversées par l'État, sans nécessiter de subventions.

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.

Pour le comité, il s'agit de rassembler les forces, et d'ouvrir une coordination de l'ensemble des expertises en métrologie, par une politique de décentralisation. L'Institut serait chargé de faire le recensement des laboratoires et instituts

du territoire capables de faire des travaux d'essais de haute technicité, et de les mettre en coordination, sous la responsabilité du futur LNE/Institut, doublé d'une commission scientifique *ad hoc*, distincte du comité directeur du LNE.

Enfin, dernier point important, la question des salaires du personnel a fait couler beaucoup d'encre. L'attribution de salaires comparables à ceux de l'industrie est une condition d'une solution satisfaisante et serait envisageable par alignement sur l'EDF par exemple.

Le rapport de 1964, ce qu'il dit, ce qu'il est

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.

Dans les mots et dans les esprits, le virage est pris. C'est l'effet de la réunion, pour la première fois, au Cnam, du LNE,

du CEA et du BIPM pendant un an. Tous les acteurs de la métrologie ne sont pas réunis à ce moment-là, puisque le LCIE et l'Observatoire par exemple sont hors de ce comité, pour une raison simple au départ : leurs activités ne recourent pas celles du LNE de 1964. L'autre laboratoire important, et absent, est bien sûr le LCA, Laboratoire central de l'armement, nous y reviendrons.

C'est un point de rencontre singulier, le Cnam, à un moment singulier, la crise d'un laboratoire, qui conduit à réunir des acteurs éminents de la métrologie. Le rapport de 1964 montre également la méconnaissance des acteurs eux-mêmes de ce qui est produit en matière de métrologie au plan national (à commencer par les activités du LNE lui-même).

Dans les intentions affichées par le comité, le modèle promu est celui de l'intégration : il s'agit de mettre en place un système équivalent à ce qui existe ailleurs, aux États-Unis, Angleterre, Allemagne. L'intrusion du BIPM et de Jean Terrien n'est sans doute pas étrangère à cette perspective, lui qui a les yeux sur l'échelle internationale. Le LNE, au sein du Cnam, est alors perçu en 1964 comme pouvant devenir le pivot du système. 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 : entre les préconisations, les pistes de 1964 et la solution BNM de 1969, interviendront justement toutes les parties prenantes. Ce moment de rencontre et de diagnostic, en 1964, 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.

Élaborer une solution nationale : mise en place d'une structure nationale inédite.

Si nous nous sommes focalisés jusqu'ici sur le Cnam et le LNE, il est clair cependant que l'élaboration de la structure nationale ne peut se comprendre qu'à une échelle plus large. D'abord parce qu'il faut inclure un second acteur impliqué très tôt dans la réflexion sur la Métrologie nationale, tout à fait indépendamment du processus interne au Cnam pendant un temps : la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) c'est-à-dire la direction qui pilote les recherches pour l'armée, en France. La construction associera ensuite, dans un second temps, une troisième instance de la coordination interministérielle de la recherche en France, la DGRST.

Parallèlement, il faut projeter l'ensemble de ce processus dans le contexte

national et international, qui constitue la toile de fond de la réorganisation. Car la restructuration de la Métrologie française est liée à la convergence d'impératifs à la fois circonstanciés au LNE, et congruentes aux dynamiques de long terme, à l'échelle nationale et internationale.

La métrologie au niveau international

Les évolutions de la métrologie à l'échelle internationale, engagées à partir de 1875, et très marquées dans les années 1960, constituent une première grande dynamique de fond. Le système métrologique international repose sur la « Convention du mètre », traité international signé en 1875, dont l'organe décisionnel est la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), réunissant les membres de ce traité au BIPM à Sèvres. La première CGPM, tenue en 1889, a sanctionné les premiers étalons internationaux du kilogramme et du mètre. Le traité rassemble de plus en plus de nations, qui trouvent leur intérêt à se raccrocher au Système International d'unités (SI). Les travaux scientifiques et l'activité diplomatique, simultanés, à l'échelle internationale, sont intenses lors des CGPM qui se succèdent durant les années 1960. En 1960, une nouvelle définition du mètre est adoptée, première redéfinition depuis 1889 ; la définition de la seconde est modifiée par deux fois en 1960 puis 1967. Ces amendements successifs confèrent une certaine maturi-

té au Système International, qui ne cesse de s'étendre, de se mondialiser.

Dans cette période d'effervescence métrologique des années 1960 la France est relativement absente de tous les travaux scientifiques, hors du secteur des grandeurs électriques³². Le BIPM étant situé sur le territoire français, ce paradoxe ne manquera pas de marquer les esprits lors des débats organisés, à l'échelle de la France, au sujet de la restructuration du système national.

Une autre organisation internationale se met en place parallèlement : le CODATA (Committee on Data for Science and Technology), visant l'échange, le partage de données scientifiques et de constantes fondamentales. Le CODATA est instauré en 1966 et sa première assemblée générale se tient en France, avec pour autres membres fondateurs, l'Allemagne, les États-Unis, le Royaume-Uni, le Japon, l'URSS (viendra ensuite le Canada). La première grande conférence internationale CODATA est organisée en 1968, en Allemagne. L'événement est marquant à plusieurs titres. D'abord parce que des représentants des métrologies de différents pays sont représentés (PTB pour l'Allemagne, NPL pour le Royaume-Uni, NBS pour les États-Unis), mais que personne ne peut représenter une Métrologie française non suffisamment

organisée. Par ailleurs, un des rares participants français est Georges Denègre, dont l'action pour la structuration de la Métrologie nationale sera déterminante : c'est à l'occasion de ce CODATA qu'il peut observer les dispositifs à l'étranger, pour nourrir le projet. Il est confronté tout particulièrement au système allemand, pays hôte, où l'enseignement de la métrologie trouve une place croissante dans les universités techniques. À ce CODATA, Denègre est délégué pour la DRME : nous verrons dans la suite de l'article à quel point cela est significatif de l'intérêt militaire pour ces questions, dans la période gaullienne.

Le contexte national et européen

La pression pour la restructuration du système français n'est pas uniquement liée aux évolutions et convergences des références à l'échelle internationale. C'est bien parce que l'organisation métrologique est perçue comme une nécessité du développement industriel que le mouvement se met en marche. Au niveau économique, politique et industriel, la pression se fait sentir et plusieurs dynamiques se mettent en place.

D'abord en période de croissance économique et industrielle, les Trente Glorieuses, la demande pour des études, pour des essais, pour des étalonnages est croissante : c'est un des facteurs qui conduit le LNE du Cnam en situation de crise. À une autre échelle, la construction européenne, encore débutante, incite les

³² Le LCE est représenté au Comité consultatif d'électricité, au sein du BIPM. Paul Janet, fondateur du LCE, a été le premier président de ce CCE, créé en 1927.

pays de la CEE/CECA à des rapprochements économiques, politiques, qui toucheront la métrologie à un moment ou un autre. La convergence européenne est un horizon déjà intégré dans l'agenda de nombreux acteurs de la métrologie (qui ont les yeux rivés à l'international, de par la nature même de la métrologie). Or, les systèmes allemand et anglais existent, sont solides, mais n'ont pas d'homologues en France.

C'est durant la période gaullienne (1958-69) que le relais sera pris, au plan politique : le diagnostic des moyens métrologiques nationaux réalisé en 1967 (que nous allons détailler dans la suite) conduira à la construction des solutions *ad hoc* dans les deux années qui suivront. Cet effort pour la métrologie est tardif dans les décisions concernant le développement scientifique et technique, qui est une des priorités nationales, sous de Gaulle³³. Les priorités bien connues de cette période sont l'atome, l'aéronautique, l'informatique : réorganisation du CEA, création du CNES (1961), lancement du « Plan Calcul » (1966) en vue de la création de « champions nationaux » et de structuration d'établissement comme l'IRIA (Institut de recherche en informatique et automatique). L'organisation de la métrologie s'inscrit dans cette veine, avec la même volonté politique d'organisation et de développement. La démarche engagée en métrologie bénéficie en outre des

outils ayant permis d'œuvrer pour une politique scientifique et technique, mise à l'épreuve dans les structures mentionnées. Deux structures sont essentielles dans les manœuvres pour la métrologie : la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) et la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique) créées en 1961. Nous sommes bien dans un régime qualifié de « fordiste » (Bonneuil, 2013) caractérisé par un rôle majeur pris par l'État dans la régulation économique, par la planification, et dans une période de croissance forte, qui se concrétise par cette redynamisation, perçue comme nécessaire, de la Métrologie française.

Les « actions concertées » et diverses actions interministérielles sont les outils qui conduiront à la création du BNM. Les premières « actions concertées » portant sur l'instrumentation scientifique sont inaugurées en 1964 par la DGRST³⁴. La première vague de financement est concomitante d'un travail de repérage, d'état des lieux sur la conception des instruments scientifiques en France³⁵. Dans un second

³⁴ Voir les Rapports sur les actions concertées de la DGRST, publiés dans les volumes « Le progrès scientifique », Paris, La documentation française – en particulier, ceux de 1967-68 pour le contrat.

³⁵ « Le progrès scientifique » n° 110 – juillet 1967 – « À propos des instruments de mesure destinés aux laboratoires de recherche » (par M^{me} Moralès-Nieva et M. Michel Désécures) pp. 32-36 : les auteurs montrent le contexte de concurrence dans lequel se trouve le secteur de l'instrumentation en France, et insiste sur la définition d'une politique scientifique et technique spécifique à ce secteur.

³³ Voir par exemple : (Pestre, 1996), (Duclert, 2001), (Jacq, 2002) et (Bonneuil, 2005).

temps, les actions sont recentrées sur un certain nombre de priorités : spectrométrie, micrométrie, moyens d'analyse et basses températures. Notons que le Cnam bénéficie dès 1966 d'un financement, pour des travaux d'étalonnage de sondes au germanium à basse température, au LNE³⁶.

Le LNE à l'ordre du jour du conseil d'administration du Cnam

Sur cette toile de fond, la première arène des débats relatifs à la Métrologie nationale est le conseil d'administration du Cnam, saisi par la crise du LNE et les discussions autour du rapport de 1964. Pourquoi le sujet est-il si important ? Pour une raison simple au fond : le LNE est une entité structurante du Cnam et, surtout, il représente environ les deux tiers de sa masse salariale³⁷.

³⁶ En 1970, l'action est reconduite, et sera cette fois inscrite dans l'équipe de l'Institut national de métrologie, non plus étiquetée LNE au niveau de la DGRST : « Rapport d'action concertée 1970 » – Numéro spécial, mai 1971, numéro 1 – « Instruments de mesure scientifique ». L'équipe du LNE, puis INM, qui reçoit ce contrat est dirigée par A. Moser et G. Bonnier. À noter qu'en 1970, au bilan d'étape, l'instance DGRST ne manque pas de souligner une carence concernant la métrologie dans ce domaine des basses températures : même si toutes les garanties de soin et de sérieux sont réunies au laboratoire, « on peut seulement regretter que le rythme d'exécution ne soit pas plus rapide. En dépit des efforts réels qui ont été dépensés dans ce sens, il faut y voir une conséquence des difficultés rencontrées pour renforcer l'équipe de recherche en spécialistes valables. » (p. 17).

³⁷ Évaluations faites sur la base des Rapports d'activité du LNE et du Cnam, sur la période 1960-67. [Archives du Cnam, Procès-verbaux du conseil d'administration – 1960-67.]

Soulignons que, dans la période qui nous occupe, le conseil est présidé par René Mayer³⁸ : homme politique important, ancien ministre, ancien président du Conseil de la IV^e République, il avait succédé à Jean Monnet à la présidence de la CECA (Communauté européenne du charbon et de l'acier). Il a également été PDG de sociétés industrielles, mais n'est pas particulièrement informé des questions de métrologie. Il saisit cependant rapidement que la question est importante, afin de ne pas entraver le développement économique et industriel français, avec en arrière-plan la perspective européenne. Il fait donc en sorte que les débats puissent pleinement suivre leur cours au sein du conseil d'administration.

L'événement qui va s'avérer décisif dans l'orientation des débats et des décisions est l'entrée de Pierre Aigrain dans ce conseil d'administration, en 1965. Pierre Aigrain est alors directeur de l'Enseignement supérieur, il rentre au conseil d'administration à ce titre³⁹. Peu de décisions engageantes pour l'institution sont prises avant 1967, si ce n'est de combler le déficit du LNE qui se creuse.

³⁸ Site de l'Assemblée Nationale, consulté le 2 mai 2015 [http://www.assemblee-nationale.fr/sycomore/fiche.asp?num_dept=5138]. Mayer a été président du Comité permanent de la Sofina (Société financière de transports et d'entreprises industrielles), président de la Société du nickel, dont les principaux actionnaires sont la Banque Rothschild et la Banque de l'Indochine, président de la Société de recherche pétrolière, Eurafrep SA, administrateur des Grands travaux de Marseille, etc.

³⁹ [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 21 mai 1965.]

C'est un moment néanmoins important car Aigrain se trouve aux premières loges de la crise du LNE et des déficits de plus en plus avérés de la Métrologie nationale⁴⁰. Il a très probablement eu copie du rapport de 1964, en préliminaire à ces séances⁴¹.

Les conclusions du comité de 1964 vont faire leur chemin, jusqu'en 1967, moment où 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). Maurice Bellier est prolongé pour deux ans à la tête du LNE⁴², et désigné pour assurer cette mission de transformation du LNE en « Laboratoire national de métrologie et d'essais ». En qualité de directeur de l'Enseignement supérieur, Aigrain agit au conseil d'administration et en direct avec le nouveau directeur du Cnam,

Paul Guérin⁴³, pour la création d'une chaire au Cnam dédiée à la métrologie. Au conseil d'administration de 1967, même s'il n'est pas présent, la position de la direction de l'Enseignement supérieur, sa position est-on tenté de dire, est affichée: accord global avec le rapport de 1964 et « *priorité absolue à la recherche métrologique* »⁴⁴.

Pierre Aigrain est le personnage clé du passage de ce contexte circonscrit au Cnam, vers les instances qui pilotent l'action de politique scientifique nationale. Car Aigrain a été directeur scientifique de la DRME de 1961 à 1965 (ministère des Armées), puis directeur de l'Enseignement supérieur jusqu'en 1967 puis délégué général à la Recherche scientifique et technique (DGRST) à partir de 1968. Or, c'est bien au sein de la DRME et du Cnam, puis en concertation avec la DGRST que se joue la reconfiguration, à l'échelle nationale, de la métrologie.

40 Pierre Aigrain est présent aux conseils d'administration successifs : 21 mai 1965, 24 septembre 1965, 19 novembre 1965. Il assiste aux échanges postérieurs aux discussions sur le rapport sur le LNE, mais le dossier est loin d'être clos : le déficit se creuse, les demandes de personnel supplémentaire pour le LNE sont refusées, Aigrain a un condensé de la crise du LNE.

41 Les résultats du groupe de travail de 1964 ont été diffusés, et en particulier transmis à la Direction des Enseignement supérieur. Aigrain arrive à cette direction en 1965. Étant donné toutes ces circonstances il est très hautement probable qu'il ait lu ce rapport.

42 Bellier est prolongé jusqu'en décembre 1969, soit deux ans au-delà de sa cessation d'activité programmée en 1964 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1967].

La métrologie, sujet civil et militaire, pour la DRME

En effet, de manière très probablement assez détachée de la crise au LNE à ses tout débuts, la DRME organise un groupe de travail et commande un

43 Lettre du 13 juin 1967 à Paul Guérin. Paul Guérin a été nommé directeur du Cnam en novembre 1965.

44 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1967.]

rapport en 1966 sur l'état de la métrologie en France : le contrat correspondant et la rédaction du rapport sont pris en charge par l'ingénieur Émile Fromy⁴⁵. Cette commande n'a rien de surprenant en soi. L'intérêt du ministère des Armées, de ses scientifiques et techniciens (les physiciens Lucien Malavard, président de la DRME, et Pierre Aigrain, au premier chef) pour la métrologie et les instruments de mesure n'est pas une surprise, et n'est certainement pas nouveau.

La mission de la DRME est claire, il s'agit « *de déceler et d'intensifier les travaux dits de pointe, susceptibles d'orienter à long terme la politique d'armement de la Nation* »⁴⁶. La DRME a été créée au sein de la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement), elle dispose également de la tutelle sur l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA)⁴⁷. Comme l'explique Vincent Duclert⁴⁸, la DRME se calque

sur le modèle de la DGRST et devait permettre de surmonter le phénomène historique d'autonomie et de concurrence des trois armes ayant développé leurs propres structures de recherche, de dépasser le niveau technique de développement des prototypes et de la production des armements pour viser à une véritable politique de la recherche. Il s'agit de créer une organisation moderne et cohérente pour un secteur stratégique, représentant 36 % du financement public de recherche et de développement en 1965. Par le biais de sa direction des recherches scientifiques, la DRME agit en étroite collaboration avec la DGRST. Pierre Aigrain le rappelait lui-même en 1987 : « *La DRME a joué un rôle important dans ces années-là, grâce à une grande liberté d'action permise par une croissance soutenue des moyens d'intervention financiers. Elle bénéficiait également d'une très grande souplesse d'action. La DRME pouvait faire ce que le CNRS commençait, déjà, à ne plus pouvoir faire lui-même* »⁴⁹.

⁴⁵ Émile Fromy (1898-1987) est un spécialiste des mesures en radiotechnique et aéronautique. Il est ingénieur de l'École supérieure d'électricité. Le rapport est publié sous la forme d'un *Répertoire des moyens métrologiques en France : Laboratoires officiels* (Fromy, 1967).

⁴⁶ (Duclert, 2001, p. 656 et suivantes.) Aigrain le formule ainsi : « *L'activité de la DRME est [...] une activité de recherche de base et de recherche technique avec comme objectif de stimuler les travaux susceptibles d'orienter à long terme la politique d'armement de la nation.* » Intervention de Pierre Aigrain le 27 avril 1987 à l'Université Paris 1. Site Histcnrs, consulté le 2 mai 2015 [<http://www.histcnrs.fr/archives-oraales/aigrain.html>].

⁴⁷ (Pestre, 2001.) Le CEA, dépendant du même ministère, n'entre pas dans ce giron, il garde son autonomie et ses prérogatives sur la recherche en sciences nucléaires, pour le civil comme le militaire.

⁴⁸ (Duclert, 2001.)

Les articulations entre recherche et équipements, entre civil et militaire prennent des proportions nouvelles avec la DRME. La DMA a une responsabilité dans la définition de la politique scientifique, une action d'orientation et de pilotage des recherches à caractère militaire et une activité de financement qui leur est corrélée. Ce co-pilotage et co-financement s'exerce au niveau national dans

⁴⁹ Intervention de Pierre Aigrain le 27 avril 1987 à l'Université Paris 1. Site Histcnrs, consulté le 2 mai 2015 [<http://www.histcnrs.fr/archives-oraales/aigrain.html>].

de nombreux domaines scientifiques, notamment la métrologie.

Le répertoire spécifique sur la métrologie et les moyens d'essais lancé en 1966 par Fromy s'inscrit dans la continuité d'une précédente enquête : en 1962-63, la DRME avait entrepris de détecter et répertorier les recherches scientifiques et techniques propres aux armées ou intéressant l'Armée. La DRME finance par ailleurs nombre de projets de recherche en métrologie, sur tout le territoire⁵⁰. L'enquête nationale élargie, cette fois-ci pilotée par l'« action concertée BNM » (cf. *supra*) et menée au deuxième semestre de 1968 montre clairement le degré d'investissement militaire dans les laboratoires ou structures de la métrologie (l'enquête est une photographie de la période 1967-69)⁵¹. La DRME ne finance pas seule un contrat de recherche. Les contrats sont des occasions de collaborations avec la DGRST, le CNRS et le CEA dans la majorité des cas, et avec la CFTH (Compagnie française Thomson-Houston) ou la CSF (Compagnie

générale de télégraphie sans fil⁵²) quand il s'agit de contrats très tournés vers des applications.

À cela, il faut ajouter qu'il existe au sein de l'Armement un laboratoire qui travaille en métrologie, le Laboratoire central de l'armement (LCA), qui regroupe 120 personnes : 30 personnes pour la « métrologie recherche » et 90 pour la « métrologie applications ». De par la taille de ce service de métrologie, le LCA est un acteur essentiel, mais, hors du champ civil, il ne figure dans l'enquête du BNM qu'à titre indicatif.

Dans la distribution des financements, la DRME est omniprésente pour certaines activités métrologiques, et totalement absente dans d'autres. Le dispositif est piloté par le département « Équipements – Mesures – Informatique »⁵³. Les champs où la DRME est particulièrement impliquée sont : la radiométrie (et tout ce qui touche à la radioactivité, dont s'occupent le CEA et le LCA), la photométrie (avec

⁵⁰ [Archives du Service historique de la Défense, 14R19, Rapport d'activité de la DRME 1963]. Autre exemple à la fois anecdotique et significatif, en 1964, la DMA finance un centre d'étalonnage pour le LCIE, offrant aux armées, et aux industriels, une gamme étendue d'intervention et d'étalonnage, notamment dans le domaine des Hautes Fréquences. Ce qui a contribué à dynamiser la dissémination de la métrologie dans les entreprises, une conséquence qui dépasse la stricte intention technique initiale (Erard, 1995, p. 59).

⁵¹ Les chiffres donnés dans la suite sont repris de l'enquête du BNM sur l'état actuel de la métrologie en France (BNM, 1968).

⁵² Ces deux structures, qui ont des activités de production civiles et militaires, fusionnent en 1968 pour donner le groupe Thomson-CSF, aujourd'hui appelé Thalès. Il faut souligner que les divisions Recherche sont très importantes à l'intérieur même de ces groupes, et sont en contacts étroits avec des scientifiques français de premier plan (Maurice Ponte, Louis Néel, Yves Rocard...).

⁵³ [Archives du Service historique de la Défense, 14R19, Rapports d'activité de la DRME 1965-66 ; 14R25, Rapport d'activité DRME 1967 et 14R26, Rapport d'activité DRME 1968]. En 1968, le département est transformé et regroupé avec d'autres activités dans un département « Mathématiques – Informatique – Guidage ».

le CNRS), la métrologie dimensionnelle par interférométrie (avec la CFTH), la stabilisation en fréquence des lasers (avec la CFTH et le LCA), la métrologie des pressions (hautes pressions et ultravide au LCA⁵⁴), les références en « Temps » (avec le Laboratoire de l'horloge atomique d'Orsay, et la CFTH), les mesures en température (qui se développe surtout avec le CNRS, en cofinancement de la DGRST, aussi bien pour les très basses températures que pour la pyrométrie). Tout ceci est corrélé aux intérêts militaires et au besoin de soutien dans tel ou tel domaine considéré en retard, ou sous-développé : électronique, lasers, systèmes aéronautiques et aérospatiaux, ambiance « spatiale », pour n'en citer que quelques-uns⁵⁵.

La DRME est à la fois un point névralgique de cette réorganisation et à l'arrière-plan, discrète et efficace, ainsi qu'elle est souhaitée par Lucien Malavard et Pierre Aigrain. Dans ce processus, il faut souligner l'action de George Denègre (1920-2011), à la

DRME, qui s'occupe justement du département « Équipements – Mesures – Informatique ». Observateur, analyste, mais non pas acteur de la métrologie⁵⁶, il a cette distance qui lui permet de considérer la situation, complexe, de manière moins technique et plus organisationnelle. Denègre entre, en 1961, à la DRME, dans une toute jeune structure, qui cherche encore sa place et à définir ses missions. Il est ingénieur contractuel, affecté à la sous-direction technique des moyens d'essais. Ses compétences techniques, en mesure et en équipements, lui valent d'intégrer le groupe « Équipement » de la DRME.

Dans le cadre de cette mission à la DRME, il multiplie les voyages d'observation, de formation, pour cerner ce qui se fait dans les autres pays. Il visite les structures métrologiques aux États-Unis, en Angleterre, voyage en Allemagne à l'occasion du CODATA. Il observe pour

⁵⁴ Le département « Équipements – Mesures – Informatique » a fortement soutenu le LCA, depuis 1962, dans la création d'instruments (manomètre interférentiel, construits avec la société Jaeger et déposé au BIPM), d'une chaîne de mesure puis d'un laboratoire d'expérimentation en ultra-vide [Archives du Service historique de la Défense, 14R19, Rapports d'activité de la DRME 1966, p. 181].

⁵⁵ L'action concertée Électronique, conjointe DRME/DGRST a été une action importante pour construire des modes de collaboration, repris dans les actions conjointes par la suite. Voir aussi la liste des objectifs et projets à l'échelle nationale [Archives du Service historique de la Défense, Département « Équipements – Mesures – Informatique » / Programme 1968, 14R26].

⁵⁶ Pour bien saisir la nature de son implication, résumons en quelques mots son parcours. Engagé dans la Marine à 18 ans, technicien aéronautique pendant l'Occupation, il rentre à l'ONERA en 1947. Cette première partie de carrière entre Marine et Aéronautique, le conduit à un poste d'ingénieur à la SEPR (Société d'étude pour la propulsion par réaction), affecté au Service des mesures. En 1956 il change d'activité, rentre au CEA, dans le service technologique, occupé sur le développement en cours des réacteurs nucléaires expérimentaux. Lorsque s'organise au niveau européen la coordination des efforts de recherche sur l'énergie nucléaire, il postule pour intégrer l'Euratom : il se trouve propulsé au niveau européen en 1960 pour organiser des équipes internationales. Ce poste est assorti de beaucoup de missions d'études et d'échanges avec les pays européens, les États-Unis, le Canada, ce qui lui donnera beaucoup d'atouts pour son action future à la DRME et au BNM. Nous tirons l'essentiel de ces informations de son récit autobiographique (Denègre, 2013).

la DRME et commence à projeter des organisations nationales pour la Métrologie française, équivalentes aux autres concurrents/partenaires en métrologie. Il devient progressivement la cheville ouvrière du dispositif national lancé sur les rails en 1968, et qui aboutit au décret de 1969 instituant le BNM.

La création officielle du Bureau national de métrologie

Pour préciser le passage de témoin de la DRME à la DGRST d'une part, et la rencontre avec les débats au sein du Cnam, d'autre part, dressons un rapide tableau chronologique de la création du BNM. Le premier projet de « Bureau français de métrologie » est soumis en mai 1968 à la Défense nationale, porté par Georges Denègre (et Pierre Aigrain) à la DRME : on comprend aisément que le contexte ne se prête pas à une mise en œuvre immédiate. Il faudra pratiquement un an avant de signer le décret de création, le 29 mai 1969. Ce projet de Bureau français de métrologie contient les idées-forces du futur BNM, et reprend en synthèse les conclusions des rapports qui ont été rédigés sur la situation française depuis 1964.

Il s'agit de construire une structure légère permettant de fédérer laboratoires et organismes en charge de la métrologie scientifique, essais et étalonnage. Elle devra soutenir la comparaison avec les autres structures de métrologie. Ce Bureau sera placé sous la responsabi-

lité de la DGRST, le civil donc, avec un comité de direction (incluant des représentants des composantes de la métrologie existantes), un comité scientifique et un secrétariat général pour l'exécution. Il sera présidé par Jean Debiesse, le pilote du groupe de travail sur le LNE de 1964, sur la période 1970-72.

En attendant de convaincre les différents ministères impliqués de signer le décret, sans compter la démission du gouvernement de Georges Pompidou fin juillet 1968 et la relance du projet dans le circuit interministériel du gouvernement de Maurice Couve de Murville, la DGRST initie ce qui est un « Bureau provisoire de métrologie ». En effet, une « action concertée » est lancée, avec coopération les deux autres acteurs du dossier : le financement est pris en charge par la DRME, la DRME participe elle-même à l'organisation de l'action, et le Cnam est le lieu physique où s'installe ce Bureau (son secrétariat général et son premier secrétaire général, Georges Denègre).

L'« action concertée » en métrologie, interministérielle, est construite sur un modèle qui a fait ses preuves. Elle inaugure également la première grande enquête nationale visant à faire l'état des lieux précis de toutes les actions, laboratoires, projets de recherche touchant à la métrologie. Le LNE est mal connu, on imagine facilement que le nombre, la qualité et les sujets des projets concernant la métrologie à l'échelle nationale le sont encore moins. Le processus d'enquête est lancé en juillet 1968, les résultats sont

présentés en décembre 1968⁵⁷. Tous ces processus aboutissent au décret n° 69485 du 29 mai 1969 instituant le Bureau national de métrologie, qui a déjà commencé le travail de terrain.

La Chaire de métrologie au Cnam et la naissance de l'INM

Les projets et les décisions reviennent régulièrement en discussion dans l'enceinte du Cnam, du fait, toujours, de la question LNE. L'année 1967, nous l'avons esquissé, inaugure les réelles transformations du LNE et du Cnam en matière de métrologie. Le changement est rendu possible et même impératif au Cnam pour plusieurs raisons. Le professeur Pierre Fleury (1894-1976) va quitter ses fonctions et prendre sa retraite au 13 octobre 1964, c'est annoncé⁵⁸ : 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)⁵⁹. L'autre départ annoncé est

celui de Maurice Bellier⁶⁰, professeur du Cnam (Chaire d'électricité industrielle)⁶¹ depuis 1957 et directeur du LNE depuis 1949, dont la fin des fonctions est prévue pour 1967. Le LNE entrant dans une phase de crise et de transition se posera rapidement la question : faut-il confier une mission à Maurice Bellier pour assurer cette transition (en retardant l'heure de sa retraite) ou saisir l'occasion de passer le relais ? Le choix sera fait de prolonger Maurice Bellier⁶².

Le processus de redynamisation de la métrologie scientifique au Cnam est engagé par la création de la Chaire de métrologie et la recherche d'un professeur pour ce poste. C'est une pièce stratégique du puzzle, car l'enjeu est de développer l'enseignement et la recherche en métrologie, au Cnam et avec un horizon national, cela sans attendre une organisation nationale interministérielle.

La demande de création de la Chaire en 1967⁶³, à pouvoir pour le 1^{er} octobre 1967, est explicite : « *Aucune chaire de métrologie n'existe officiel-*

⁵⁷ Voir l'*Enquête sur l'état actuel de la métrologie en France*, 1968 (BNM, 1968).

⁵⁸ Notice Pierre Fleury dans le *Dictionnaire des professeurs du Cnam* (Fontanon, 1994).

⁵⁹ 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.

⁶⁰ Maurice Bellier est né en 1901, il prend sa retraite du Cnam en 1973, après plusieurs prolongations.

⁶¹ Annexe avec CV de Maurice Bellier, candidat à la Chaire d'électricité industrielle [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1957].

⁶² Arrêté du 5 décembre 1967, qui confie la mission de restructuration à Maurice Bellier jusqu'au 1^{er} décembre 1969 [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1967].

⁶³ Lettre du directeur du Cnam au ministre de l'Éducation nationale, du 12 avril 1967 [Archives du Cnam, Dossier de vacance de la Chaire de métrologie – 1967].

lement en France ». « *Le professeur de métrologie du Conservatoire aura la triple tâche de donner un enseignement de métrologie, d'animer un laboratoire de recherche fondamentale, de coordonner les activités du service de métrologie du Laboratoire national d'essais* ». On peut estimer que la position de Michel-Yves Bernard (1927-2005) a fortement pesé dans la définition du périmètre de la Chaire. Physicien, professeur du Cnam, titulaire de la Chaire de radioélectricité, il est élu au conseil d'administration : c'est une personnalité scientifique et politique forte, au Cnam et dans les ministères qui ont pris en charge les universités. Au conseil de perfectionnement du 14 mars 1967, il se fait le porte-voix du fait qu'il incombe au futur professeur une action de coordination forte en métrologie (sur le modèle américain du « type NBS »). Ce ne sera pas la solution choisie *in fine*, mais cette ligne est le prolongement du rapport de 1964. Au terme du processus, c'est André Allisy qui est recruté comme professeur⁶⁴.

⁶⁴ Il l'emporte avec 43 voix sur 53 suffrages exprimés au conseil de perfectionnement ; 14 voix sur 18 au conseil d'administration, pour être présenté en première ligne. Toutes les étapes, les échanges et les débats autour des trois candidatures à la Chaire mériteraient de longs commentaires. Les deux personnes clé dans la conduite des débats sont manifestement M.-Y. Bernard, surtout au sein du conseil de perfectionnement, et Jean Debieesse au niveau du conseil d'administration. André Allisy l'emporte sans contestation possible face à des candidats perçus comme trop âgés pour assurer une tâche dont l'ampleur est estimée à au moins 10 ans de travail. Les deux autres candidats sont M. Bassière et M. Defix. M. Bassière, né en 1907, ingénieur, à l'ONERA en 1947, responsable des « Instruments de mesure » de 1950 à 1961, puis responsable des laboratoires du Centre technique des industries mécaniques. Il a 60 ans au

En 1967, une nouvelle organisation du LNE, reprenant les conclusions du groupe de travail de 1964, se préfigure : un service général, un Institut national de métrologie, trois départements. L'INM serait un institut du Conservatoire, dont la direction scientifique serait assurée par le professeur titulaire de la Chaire de métrologie du Cnam. Il serait entièrement subventionné par l'État. Un autre département serait dédié à la recherche industrielle (sur contrats et avec des subventions), un département « Essais et mesures industrielles » pour réaliser les opérations de normalisation et certifications, avec des subventions possibles du ministère de l'Industrie. Un troisième département serait dédié aux contrôles légaux et estampillages, pour exécuter les contrôles imposés par la loi française, comme le contrôle des thermomètres médicaux.

Après la titularisation d'André Allisy à la Chaire de métrologie, le projet d'INM se précise⁶⁵. Il est prévu que l'INM soit créé au sein du LNE (utilisant les services administratifs et

moment de sa candidature au Cnam. Defix, né en 1912, a fait toute sa carrière au Service des instruments de mesure du ministère de l'Industrie, il a eu des responsabilités dans l'École supérieure de métrologie, il a une carrière de responsable, d'ingénieur et d'enseignant, moins de chercheur, ce qui lui vaudra d'être mis rapidement hors course dans le processus de sélection. [Archives du Cnam, Dossier de vacance de la Chaire de métrologie – 1967.]

⁶⁵ 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.

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.

Pour piloter l'INM une commission technique serait également constituée réunissant, outre son directeur: le président du BNM, un représentant du BIPM, le chef du Service des instruments de mesure du ministère de l'Industrie, la direction des Enseignements supérieurs (un représentant), la direction générale du CNRS (un représentant), la direction générale de la DRME (un représentant), le directeur du LNE, deux professeurs du Cnam (nommés par le directeur du Cnam), des représentants des autres laboratoires de métrologie publics ou privés, sur proposition du directeur du Cnam.

Lors de la séance du conseil de perfectionnement du 15 octobre 1968, Guérin annonce la création de l'INM par arrêté du 2 octobre 1968. L'arrêté ne passera pas l'échelon suivant: le décret n'est pas signé par le ministre de l'Éducation nationale, Edgard Faure, l'INM reste entre deux eaux jusqu'en 1989! Difficile de trouver une explication à cette non-conclusion, mis à part le fait que ce projet arrive en plein milieu d'une autre affaire certainement plus importante aux yeux du ministère: la « Loi Faure » qui restructure

l'ensemble du paysage de l'enseignement supérieur français⁶⁶.

Le processus politique et administratif autour de l'INM n'ayant pas été poussé tout à fait à son terme, cela ne facilite pas le démarrage de l'INM, en recherche de légitimité à l'intérieur même du Cnam. Dans la plupart des esprits, et en dehors du Cnam en particulier, l'Institut existe bel et bien. L'échafaudage est en quelque sorte consolidé par sa présence à part entière dans le BNM, par la restructuration du LNE en cours qui lui laisse une place en interne, et le tout est soutenu par la dynamique qu'Allisy est en train d'instaurer. Depuis 1964 et le lancement de l'idée d'un laboratoire consacré aux questions de métrologie scientifique au LNE, ce projet reste, en revanche, en interne au Cnam et au sein du LNE, un point de crispation. Lorsque Guérin avait présenté au conseil de perfectionnement le 23 avril 1968 le projet de création de l'INM, une interrogation avait d'ailleurs été immédiatement soulevée: comment se déroulerait l'arbitrage entre l'INM et le LNE en cas de désaccord? La réponse de Guérin: « *De toute façon, le directeur du Conservatoire étant directeur de*

⁶⁶ Après les événements de mai 1968, Edgard Faure avait hérité du ministère en août 1968 et au cours du mois de novembre il lance sa loi d'orientation, qui recueille l'assentiment (presque général): la loi Faure, du 12 novembre 1968, introduit une nouvelle gestion des établissements d'enseignement supérieur, met un terme aux facultés, remplacées par des unités d'enseignement et recherche. Pour un aperçu des mutations importantes opérées par cette loi, voir (Prost, 1989).

l'Institut, il aura, en cas de conflit, l'autorité nécessaire pour arbitrer ».

L'idée d'en faire un institut de sciences appliquées du Cnam (c'est ainsi que le projet est avancé dans les termes du Cnam), placé dans le LNE, contribue à amplifier cette tension. La relative démotivation du projet par la non-signature du décret, en ajoute encore. Le flou s'installe progressivement sur l'année 1968 : l'INM est-il un laboratoire du LNE comme les autres services du LNE, ou un institut du Cnam qui est en surplomb du LNE ? Toutes ces ambiguïtés au départ du projet ne manquent pas d'alimenter les interrogations sur l'avenir du LNE au Cnam, pris dans une crise au long cours.

Parallèlement, après l'annonce du lancement de l'« action concertée » BNM par la DGRST, Michel-Yves Bernard suggère qu'elle n'échappe pas au Cnam, que le Cnam devienne le point d'accueil et de développement de l'« action concertée », le tout au sein du LNE. Michel-Yves Bernard a toujours en tête le modèle du NBS, celui d'une fusion et d'une concertation entre les principaux laboratoires de métrologie français : dans ce cas le LNE a la légitimité nécessaire et suffisante pour devenir le NBS français. C'est ainsi que le Cnam accueille, *in fine*, le secrétariat général du futur BNM. Le Cnam est présent au comité de direction du BNM et c'est l'Institut national de métrologie, encore en gestation au sein du LNE, qui figure à son conseil scientifique, en son nom propre (INM) et non au titre d'une représentation du LNE.

Une nouvelle direction pour le LNE

En 1969 se pose la question de la succession de Maurice Bellier, qui dirige le LNE depuis 1949, et après prolongation de deux années. Le futur directeur se voit confier la même mission de redressement du LNE : force est de constater que peu de choses, sur le fond de la problématique financière, ont changé depuis 1964. Une nouvelle « commission provisoire » (comité scientifique et technique du LNE) se construit pour mettre en œuvre les conclusions du « comité Debiesse » à l'échelle du LNE cette fois⁶⁷. Elle sera portée par le futur directeur.

Le contexte évolue également dans le sens où le ministère de l'Industrie montre un intérêt croissant pour le LNE, le ministère de l'Éducation 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 France⁶⁸.

⁶⁷ [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1969.]

⁶⁸ À telle enseigne que le secteur de la Recherche scientifique est intégré au giron de l'Industrie dans le gouvernement de Jacques Chaban-Delmas : François-Xavier Ortoli est ministre du Développement industriel et scientifique.

Le nouveau directeur du LNE, nommé le 14 novembre 1969, est Laurent Citti. Celui-ci est né en 1938, le changement de génération par rapport à Maurice Bellier est assez radical. Il vient des sciences physiques⁶⁹ et, surtout, il travaille à la DRME depuis 1964, comme conseiller scientifique⁷⁰. Il est également, membre du Comité de physique électronique de la DGRST, signe des collaborations DRME/DGRST de cette période.

Cette entrée au LNE est en fait le début de l'aventure de Laurent Citti avec le Cnam : il restera à la tête du LNE jusqu'en 1974, puis présidera son comité de direction. Avec le changement de statut du LNE en EPIC en 1978, il deviendra le président du conseil d'administration du LNE. Parallèlement, entre 1974 et 1977, il est directeur du Cnam, et sera nommé professeur au Cnam en 1977 (avant d'en partir en 1980).

En 1970, le comité scientifique et technique réuni au LNE est composé de douze personnalités nommées par le

ministère du Développement industriel et scientifique, six professeurs du Cnam, des représentants du personnel LNE, l'ingénieur général Salmon (représentant le conseil d'administration du Cnam) et Laurent Citti. En résumé, les conclusions et discussions tournent autour des faiblesses, des lacunes et du problème financier du LNE, encore et toujours, car c'est ce qui hypothèque toute perspective de développement du LNE.

Le partage des rôles de l'INM (Cnam) et du LNE devenu EPIC

Ce qui s'organise concrètement, sous l'impulsion du directeur du LNE et de la direction du Cnam (Paul Guérin), c'est la séparation entre LNE et INM, avec la sortie du LNE de l'institution Cnam, actant de la séparation des services de « recherche » et « essais » qui semblent impossibles à associer dans le contexte du Cnam de 1970. Le conseil d'administration du Cnam s'est prononcé assez rapidement, après 1969, pour l'autonomisation du LNE, à travers le projet de création d'un EPIC appelé « Laboratoire national de métrologie et d'essais » (mais conservant le sigle LNE). La séparation est demandée en 1971, mais refusée par le ministère des Finances. Le doute persiste sur la capacité du Laboratoire à se développer par ses propres moyens, il doit faire les preuves de son aptitude à se développer de manière autonome. La question de la vérification des thermomètres revient encore une fois sur le tapis : le dispositif

⁶⁹ Formé à la Faculté des sciences d'Alger, il y est assistant, avant de quitter Alger pour la métropole en 1962. Avec l'aide de Pierre Aigrain et Yves Rocard, il part deux ans au MIT, aux États-Unis, pour travailler sur les lasers, dans l'équipe du professeur Charles Townes (prix Nobel de physique en 1964 pour ses travaux) [Archives du Cnam, Procès-verbal du conseil d'administration – 1969 et CV de Laurent Citti, p. 109]. Entretien avec Laurent Citti, par Loïc Petitgirard, le 11 décembre 2014.

⁷⁰ Dans les divisions « Plasma, Électronique quantique », « Physique des solides », puis chef du Bureau d'information scientifique.

pour automatiser les tests avait été conçu par le Laboratoire dans les années 1940, il est vétuste en 1970⁷¹. Il faut le renouveler, et donc demander de nouveaux crédits. Le Laboratoire étant toujours au Cnam, c'est à l'établissement que la dépense incombe, ce qui suscite toutes les résistances imaginables.

Dans les esprits en tout cas, le départ est acquis. Il l'est également géographiquement, avec le développement de l'INM dans le Pavillon des étalons au Cnam rue Saint-Martin. Malgré la situation tendue, il y a une certaine liberté laissée aux personnels du LNE pour choisir leur affectation : tous sont encore personnels du Cnam, le LNE et l'INM sont des services du Cnam⁷².

Les conséquences de cette séparation, qui prendra du temps et attendra 1978, sont nombreuses car le LNE représente un très gros morceau du Cnam en termes administratifs, en termes de personnels et de budget. Quitter le Cnam est synonyme de transformation de la structure du Cnam. L'INM, Institut du Cnam

dépend directement du LNE, puisque son enveloppe est intégrée à l'enveloppe du LNE. Pour le LNE lui-même, les conséquences ne doivent pas être sous-estimées, car avec le départ des équipes de recherche en métrologie, il faudra reconstruire des capacités en interne, même si elles sont minimales : la séparation entre « recherche » et « essais » est une vision plus théorique qu'il n'y paraît⁷³.

En conclusion : la redistribution des rôles dans la Métrologie nationale réorganisée.

Par rapport à la réflexion engagée en 1964, la situation de divorce de 1978 entre le LNE et le Cnam ressemble fort à un paradoxe. Le projet discuté initialement était un projet de rapprochement, de synergie, voire de fusion entre laboratoires, rapportant au LNE des acteurs extérieurs au Cnam, le CEA en particulier. En 1978, le processus aboutit à l'inverse, une dissocia-

⁷¹ Le service regroupe encore 44 personnes, 12 vérificatrices et 32 auxiliaires, et il est toujours en expansion du fait des exportations de thermomètres.

⁷² C'est ainsi qu'André Moser et Georges Bonnier, de l'équipe de thermométrie du LNE vont développer la thermométrie au sein de l'INM : A. Moser deviendra le directeur adjoint de l'INM et un personnage clé du développement de l'INM. Paul Riéty les rejoindra ensuite pour développer les recherches en acoustique, sur la pression et pour diriger les travaux sur les références « Masse » à l'INM. Ces transferts ne sont pas entravés par Maurice Bellier, et même probablement encouragés par celui-ci (voir l'entretien avec André Allisy dans ce dossier).

⁷³ À toutes ces incertitudes, s'ajoute l'imbroglio lié à une rumeur en 1976 : le LNE est annoncé en délocalisation à Auxerre dans le cadre d'un projet de décentralisation. Il s'agit d'une rumeur lancée au moment de la campagne électorale de Jean-Pierre Soisson dans l'Yonne, qui se révélera sans suite, mais une rumeur suffisante pour relancer les tensions. J.-P. Soisson est alors maire d'Auxerre depuis 1971, secrétaire d'État aux Universités dans le gouvernement Chirac (27 mai 1974 – 12 janvier 1976) (entretien avec L. Citti, par Loïc Petitgirard, le 11 décembre 2014). Les méandres de cet épisode sortent du propos de cet article, il traduit néanmoins une situation institutionnelle du LNE non encore stabilisée.

tion de services, donnant deux laboratoires sur deux trajectoires distinctes, pourtant complémentaires. En même temps qu'éclate le LNE, le BNM est constitué pour raccommo­der les morceaux d'une Métrologie française déjà très dispersée.

Pour tout à fait comprendre ce processus, il faut l'inscrire dans l'histoire longue du Cnam lui-même et de ses rapports à la métrologie⁷⁴. Il a incombé au Cnam la double tâche de conservation des étalons nationaux et de diffusion de ces étalons, depuis 1848: cette mission a été réactualisée en 1919 et 1933, en insistant sur la question des références primaires. Cette mission a été conduite avec plus ou moins de succès, et au LNE elle a été de plus en plus difficile à tenir, même avec la volonté de George-Albert Boutry. Était-elle vraiment possible avec la structure LNE d'avant 1970? L'INM peut s'entendre comme la tentative réussie de développer précisément cette mission longtemps insatisfaite. Sous l'égide du BNM, l'INM sera le laboratoire ayant pour mission d'assurer la conservation et le transfert des références métrologiques françaises pour quatre des grandeurs du Système International: masse, longueur, intensité lumineuse, température thermodynamique. C'est ce qui faisait défaut au LNE des années 1960.

La création de la Chaire de métrologie renvoie à la mission de diffusion, non pas des références en elle-même, mais des dé-

marches, des méthodes, des recherches en métrologie, au plus large public. Le cours construit par André Allisy n'a pas grand-chose à voir avec celui de Pierre Fleury, il attire divers publics et contribue à la diffusion d'une culture métrologique en France.

Le processus d'organisation au niveau du Cnam et au niveau national doit être souligné pour son caractère transministériel. Le contexte de la République sous de Gaulle, avec ses outils de gestion interministériels, la DGRST en premier lieu, en est la raison fondamentale. La DGRST n'est pas un ministère de la Recherche, pas encore. D'ailleurs c'est avec l'institutionnalisation des questions de la Recherche dans des ministères que ce caractère transministériel s'estompe⁷⁵. De manière très symptomatique, le LNE transformé en EPIC en 1978 dépendra du ministère de l'Industrie, l'INM du ministère de l'Éducation nationale. Avec pour effet d'éloigner la métrologie primaire des services à l'industrie, tout en rapprochant la métrologie scientifique des laboratoires de recherche. C'est au niveau du BNM que la Métrologie française peut surmonter ces effets de territoire et orga-

⁷⁴ Dans le cadre gouvernemental jusqu'en 1977 existeront: le ministère du Développement industriel et scientifique (sous la présidence Pompidou, Gouvernement Chaban-Delmas, 1969-72 puis Gouvernement Messmer), ministère de l'Industrie et de la Recherche (présidence Giscard-d'Estaing, Gouvernement Chirac, puis Gouvernement Barre) à côté du ministère de l'Éducation nationale. L'Industrie et la Recherche sont sous une commune tutelle avant que soit nommé un secrétaire d'état à la Recherche en 1977, Jacques Sourdille qui sera remplacé par Pierre Aigrain en avril 1978.

⁷⁴ Voir le texte de C. Fontanon et L. Petitgirard dans ce dossier pour plus de détails.

niser la chaîne métrologique, des références primaires jusqu'aux utilisateurs.

Le rôle du militaire

Entre 1966 et 1969, nous avons vu que l'impulsion de la DRME a été un facteur important dans la structuration nationale de la métrologie. La DRME a été initiatrice, elle a financé l'effort de redynamisation des recherches en métrologie et instrumentation et, en 1969, elle passe le témoin au BNM et à la DGRST, donc aux structures civiles, pour organiser et finaliser la mission. Rappelons que Laurent Citti, au LNE, et Georges Denègre au niveau du BNM, sont issus de la DRME. Ce sont des acteurs clé de la restructuration, au même titre que le directeur du Cnam Paul Guérin, Jean Debiesse au CEA, Jean Terrien au BIPM, et Pierre Aigrain à de multiples niveaux (DRME/DGRST).

L'année 1969 marque un tournant (outre qu'elle voit le Général de Gaulle quitter le pouvoir) au niveau même de la DRME, qui se réorganise. Le programme de recherche et les centres d'intérêt militaires sont en réévaluation, et le référentiel change au sein du groupe « Mathématiques – Informatique – Guidage » pour répondre aux directives ministérielles⁷⁶: « *L'activité du groupe « Mathématiques – Informatique*

– Guidage » est centrée sur le traitement de l'information ». Les nouveaux thèmes prioritaires sont donc la recherche sur les capteurs, les moyens du traitement de l'information, le développement des calculateurs. La question de la mesure et de la métrologie, du point de vue de la DRME, se cantonne désormais au guidage: téléguidage, référence de temps, gyroscopes.

Le nouveau rôle du Cnam dans la Métrologie nationale

La création du BNM, de la Chaire de métrologie et de l'INM au Cnam inaugure la restructuration de la métrologie à la fin des années 1960. Les discussions reprendront dans les années 1980 après une phase de consolidation, de maturation, de rapprochements et de tensions.

Au travers de cet article, nous avons pu montrer que cette histoire est le produit d'une hybridation de différentes cultures: institutionnelles, académiques et industrielles, militaires et civiles. L'hybridation a été réalisée par des personnalités, aux parcours variés, qui traversent les frontières (du militaire au civil, tout particulièrement) et ont été capables de s'accorder: ingénieurs, physiciens, techniciens, grands commis de l'État qui ont été pour certains, à l'image de Pierre Aigrain, des scientifiques éminents. En cela elle poursuit la longue histoire des relations du Cnam aux « Poids et Mesures » au XIX^e siècle. Ainsi l'INM est-il un produit du LNE, un

⁷⁶ Projet de programme de recherche 1969, n° 025745/DRME [Archives du Service historique de la Défense, 14R27].

fruit de son évolution, grâce aux équipes qui s'agrègent à l'équipe de recherche en métrologie dès 1968-69, amenant des savoir-faire du LNE. Ces équipes sont associées à des équipes issues du réseau d'André Allisy, par le BIPM et Jean Terrien⁷⁷. Laurent Citti apporte son expérience de la DRME au Cnam, pour amplifier la transformation.

Ces hybridations se sont faites dans différents lieux propices à ces rencontres, le Cnam en fait partie. Sa structuration en conseil de perfectionnement, conseil d'administration, chaires lui permet d'être une instance hybride, un lieu où se confrontent les milieux académiques, industriels, militaires, politiques. La tenue des réunions et commissions de 1964-67 a été possible parce que l'arène du Cnam permet de faire se rencontrer des acteurs de toute nature (universitaires, industriels, militaires, administrateurs, ministères), de faire converger des cultures techniques et scientifiques, de la vie économique et académique. Le Cnam a aussi le poids de l'histoire, une relation de longue durée avec la métrologie. Il reste que les conclusions de 1964 sont en décalage par rapport à la trajectoire propre du Cnam, à l'histoire de l'institution. Et que le LNE quitte le Cnam dans ce processus.

Avec l'intégration européenne, la chute de l'URSS et l'ouverture d'une nouvelle mondialisation, les cartes de l'organisation de la métrologie sont rebattues au cours des années 1980. La dynamique interne à la métrologie pousse à toujours plus de rapprochements entre « recherches » et « essais et contrôles ». Le BNM sera le point de rencontre, le levier de la seconde phase, mais le Cnam (avec l'INM et ses missions de conservation des étalons nationaux), continue à jouer un rôle important de terrain de négociation, de point de rencontres en dépit des crispations institutionnelles conséquentes au « divorce » avec le LNE. Il faut souligner que parmi les acteurs aux commandes dans les années 1980, on retrouve ceux qui ont été installés en 1968-69. Après la transformation du BNM en GIP (Groupement d'intérêt public) en 1994, semble s'engager enfin ce qui était attendu dans les intentions des années 1960 : les collaborations se renforcent, aboutissant aujourd'hui (depuis 2008) au Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM).

⁷⁷ Voir l'entretien avec André Allisy, par L. Petitgirard et C. Fontanon, dans ce dossier. L'arrivée de Jean Bastie à l'INM passe par ce réseau de la recherche en optique (Jean Terrien est un élève de Charles Fabry, et spécialiste d'optique, de photométrie) qui conduira au développement de la photométrie au Cnam. Voir le texte de Jean Bastie dans ce dossier.

Bibliographie

Alder, K. (1995). « A Revolution to measure – The political economy of the metric system in France. » In Wise, N. (éd.). *The Values of Precision*. Princeton (N.J.): Princeton University Press, pp. 39-71.

Alder, K. (2005). *Mesurer le monde : 1792-1799*. Paris, France : Flammarion.

Bernard, M.-Y. (1994). *Le Conservatoire national des arts et métiers : vers le xx^e siècle*. Paris : Eyrolles.

Blondel, C. (1990). « Les premiers Congrès internationaux d'électricité. » *Relations internationales*, 62, pp. 171-182.

BNM (1968). *Enquête sur l'état actuel de la métrologie en France*. Paris : Bureau national de métrologie, 1968.

BNM (2004). *La métrologie scientifique en France : les 35 ans du Bureau national de métrologie*. Paris : Bureau national de métrologie.

Bonneuil, C. (2005). « Les transformations des rapports entre sciences et société en France depuis la Seconde Guerre Mondiale : un essai de synthèse. » In Babou, I., Le Marec, J. (éd.) *Sciences, médias et société* (actes du colloque 2004). Lyon : ENS-LSH, pp. 15-40.

Bonneuil, C. et Joly, P.-B. (2013). *Sciences, techniques et société*. Paris : La Découverte.

Boudia, S. (2001). *Marie Curie et son laboratoire. Science et industrie de la radioactivité en France*. Paris : Archives contemporaines.

Buchwald, J. Z. (1996). *Scientific Credibility and Technical Standards in 19th and Early 20th Century Germany and Britain*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.

Cahan, D. (1989). *An institute for an empire : the Physikalisch-Technische*

Reichsanstalt (1871-1918). Cambridge : Cambridge University Press.

Caron, F. et Cardot, F. (éds.) (1991). *Histoire générale de l'électricité en France*. Paris : Fayard.

Denègre, G. (2013). *Carnets de route sinueuse*, Paris : Société des Gens de Lettres.

Duclert, V. (2001). « L'invention d'une haute institution gouvernementale. La Délégation générale à la recherche scientifique et technique. » In Duclert, V. et Chatriot, A., *Le Gouvernement de la Recherche*. Paris : La Découverte.

Erard, L. (1995). « Le laboratoire central des industries électriques (B.N.M.-L.C.I.E) et la métrologie électrique. » *Bulletin du BNM*, n° 100, avril 1995, pp. 57-83.

Fontanon, C. et Grelon, A. (éds.) (1994). *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique, 1794-1955*. 2 volumes. Paris, France : Institut national de recherche pédagogique : Conservatoire national des arts et métiers, 1994.

Fromy, E. (1967). *Répertoire des moyens métrologiques en France. Laboratoires officiels*. Paris : Sedocar.

Garnier, B. et Hocquet, J.-C. (éds.) (1990). *Genèse et diffusion du système métrique*, Caen : Diffusion du Lys.

Hartmann, G. L. (1901). « Rapport de la commission d'enquête sur les laboratoires officiels d'essai de Berlin, Munich, Dresde, Vienne et Prague. » *Annales du Cnam*, 1901, 3^e série, Tome III, pp. 93-162.

Jacq, F. (2002). « Aux sources de la politique de la science : mythe ou réalités ? (1945-1970). » *La revue pour l'histoire du CNRS*, 6.

Joerges, B. et Shinn, T. (2001). *Instrumentation : between science, state and in-*

dustry. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Le Moël, M., Saint-Paul, R., et Fontanon, C. (éd.) (1994). *Le Conservatoire national des arts et métiers au cœur de Paris, 1794-1994*. Paris: Conservatoire national des arts et métiers/Délégation à l'action artistique.

Marquet, L., Le Bouch, A. et Roussel, Y. (1997). *Le système métrique, hier et aujourd'hui*. Amiens: Association pour le développement de la culture scientifique, DL 1997.

Monzie, A. (1948). *Le conservatoire du peuple*. Paris: Sedes.

Moreau, H. (1975). *Le système métrique: des anciennes mesures au système international d'unités*. Paris: Chiron.

Pestre, D., Jacq, F. (1996). « Une re-composition de la recherche académique et industrielle en France dans l'après-guerre, 1945-1970. Nouvelles pratiques, formes d'organisation et conceptions politiques. » *Revue Sociologie du travail*, n° 3/96, pp. 263-277.

Pestre, D. (2001). « La création de la DMA et de la DRME en 1961 : projet politique stratégique ou construction conjoncturelle ? » In Duclert, V. et Chatriot, A., *Le Gouvernement de la Recherche*. Paris : La Découverte.

Prost, A. (1989). « 1968: mort et naissance de l'université française. » *Vingtième Siècle*, n° 23, pp. 59-70.

Salmon, P. (1956). *Métrologie industrielle*. Paris: Société de publications mécaniques.

Schiavon, M. (2014). *Itinéraires de la précision: géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments de précision en France*. Nancy: PUN – Éditions universitaires de Lorraine.

Shinn, T. (1980). « Genesis of France Industrial Research. » *Social Science Information*, 19, p. 607-640.

Soubrier, M. (1918). *Les industries électriques d'hier et de demain. L'enseignement de l'électricité industrielle*. Paris: Dunod.

Wise, N. (1995). *The Values of Precision*. Princeton (N.J.): Princeton University Press.

L'aventure de la photométrie au Cnam (1970–2005)

Jean Bastie

Ingénieur honoraire – Laboratoire commun de métrologie LNE/Cnam

Loïc Petitgirard

HT2S, Cnam.

Résumé

Cet article montre les étapes de la construction de l'activité de photométrie au sein de l'Institut national de métrologie du Cnam, à partir de 1970. Cette aventure s'inscrit dans l'histoire longue de la photométrie et du Cnam, auquel incombe la charge de réaliser des étalons nationaux. On détaille ici les réalisations successives du Laboratoire, depuis la réalisation de la « candela » en 1985, et les vingt années de perfectionnements techniques qui ont suivi. Étape par étape, on montre la complexité du travail des métrologues, l'accumulation, sur les temps longs, de savoir-faire nécessaires à cette activité et l'articulation trouvée au Cnam, entre l'INM et les formations de la Chaire de métrologie.

Introduction

L'histoire de la photométrie au Cnam est une longue histoire, dans laquelle plusieurs générations de physiciens, ingénieurs, techniciens se sont investies. Elle est elle-même inscrite dans une histoire plus générale et plus ancienne entre le Cnam et la métrologie. Les travaux les plus anciens connus dans ce domaine sont dus à Jules Violle, professeur au Cnam à partir de 1891, qui proposa un phénomène physique spécifique pour la réalisation de l'unité d'intensité lumineuse, unité de base de la photométrie. Lorsque la 19^e Conférence générale des Poids et Mesures de 1948 promulgua la première définition de l'unité d'intensité lumineuse, la candela, Maurice Debure, alors chef du service photométrie du LNE (le Laboratoire national d'essais, qui était encore un laboratoire du Cnam) a assuré la réalisation pratique, dans le cadre des prérogatives de ce laboratoire. Puis, en 1970, suite à la création de l'Institut national de métrolo-

gie, la responsabilité de la réalisation des unités photométriques a été transférée à l'équipe « photométrie » de cet institut¹.

Il incombe au Cnam des responsabilités en métrologie depuis le XIX^e siècle. La modification de l'organisation de la métrologie au moment de la création du BNM (Bureau national de métrologie), au tournant de 1968-1969, a conduit à la séparation des activités d'étalonnage confiées au LNE de celles de réalisation et de maintenance des étalons confiées à l'INM (Institut national de métrologie, laboratoire du Cnam). La séparation géographique s'est ajoutée à celle de ces deux types d'activités : les équipes de l'INM, en particulier l'équipe de photométrie, se sont installées dans les locaux du Cnam, rue Saint-Martin, Paris III^e, tandis que les activités d'étalonnage restaient rue Gaston-Boissier, Paris XV^e. Cet article présente, dans le détail, l'histoire du Laboratoire de photométrie de l'INM depuis sa création en 1970 jusqu'à 2005. Il est écrit dans une perspective documentaire et historique. En effet, cette histoire n'a pas encore été écrite, et l'une des principales sources d'information est la mémoire des acteurs de cette histoire, qu'il s'agit de traduire ici. L'article construit la narration d'une série de réalisations dont il reste des traces partielles, assorties de publications scientifiques sur lesquelles

nous nous appuyons. L'article contextualise ces travaux et il présente aussi l'évolution conceptuelle de la photométrie qui a conduit à une nouvelle définition de l'unité d'intensité lumineuse et à la série de réalisations techniques qui ont été rendues nécessaires pour matérialiser cette nouvelle définition.

Dans le Système international d'unités (SI), les unités photométriques occupent une place à part qui s'explique par les phénomènes en jeu. En effet, ces mesures font intervenir l'interaction de deux éléments de nature différente : le rayonnement optique et l'œil de l'observateur. Le rayonnement optique est un phénomène physique défini par la puissance transportée par les différentes longueurs d'onde qui le composent, alors que l'œil de l'observateur est un organe biologique dont les caractéristiques dépendent de chaque individu. Les méthodes de mesures et la définition des grandeurs et des unités doivent donc prendre en compte cette double nature et l'histoire de la photométrie est intimement liée aux progrès réalisés aussi bien dans la mesure des rayonnements que dans la connaissance du fonctionnement de l'œil. La photométrie, et plus généralement la mesure des rayonnements optiques, fait intervenir un certain nombre de grandeurs et d'unités spécifiques². Les principales grandeurs

¹ Pour tout ce qui concerne la transformation institutionnelle du Cnam, la création de l'INM au tournant de 1967-1970, voir, dans ce dossier, l'article de L. Petitgirard.

² Ajoutons quelques précisions, sur la distinction entre radiométrie et photométrie. Il existe deux manières distinctes de mesurer les rayonnements optiques. La première consiste à mesurer l'énergie transportée par le rayonnement, c'est la radiométrie. La seconde consiste

utilisées pour la caractérisation des rayonnements optiques sont l'intensité lumineuse (dont l'unité est la candela), le flux lumineux (donné en lumen), l'éclairement (en un point d'une surface, mesuré en lux) et la luminance.

L'article est organisé en deux grandes parties. La première s'intitule « Mesurer la lumière avant 1970 » et nous proposons de faire un point rapide sur l'histoire de la mesure de la lumière, avant 1970 : pourquoi en est-on venu à mesurer la lumière ? Quels ont été les moyens mis en œuvre ? Nous précisons ici les travaux en photométrie au Cnam réalisés par Jules Violle et Maurice Debure. La seconde partie relate les réalisations à l'INM spécifiquement. Nous présenterons en détail les techniques et savoir-faire mis en jeu et développés dans ce laboratoire de métrologie primaire³. On mettra un premier accent sur la réalisation de la candela suite à la nouvelle définition adoptée en 1979, car l'INM

à mesurer l'effet des rayonnements optiques sur l'œil de l'observateur, c'est la photométrie. La radiométrie et la photométrie utilisent le même système de grandeurs mais les unités sont différentes. De plus, le domaine spectral de la photométrie est limité au domaine visible (ce que peut percevoir l'œil), qui est compris entre les longueurs d'onde 380 nm et 780 nm, alors que celui de la radiométrie couvre non seulement le domaine visible mais s'étend aussi à l'ultraviolet et à l'infrarouge.

³ Le Laboratoire a la responsabilité de créer et conserver des références nationales, et d'assurer leur dissémination, par étalonnage sur les étalons primaires produits au Laboratoire. Selon le vocabulaire international de métrologie en cours aujourd'hui, un étalon primaire est « établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet par convention ». De cet étalon découle, par étalonnages, les étalons secondaires, les étalons de travail.

portait alors la charge de sa réalisation en vue de sa dissémination. Dans un second temps, on montrera la suite des perfectionnements apportés au dispositif en vue d'augmenter la précision sur la candela, et sur les unités dérivées. Cet épisode, replacé dans la longue durée, montre la face cachée d'une activité de métrologie contemporaine, avec ses moyens, ses méthodes, et la nécessité de capitaliser de l'expérience, un savoir-faire, sur des temporalités relativement longues.

Mesurer la lumière avant 1970

Évolution des unités et des concepts de la photométrie

Si l'utilisation de la lumière créée artificiellement remonte à la plus haute antiquité, sa mesure n'est apparue que très tardivement en comparaison d'autres grandeurs, telles que la longueur, la masse ou le temps. Les premiers travaux sur ce sujet ont été conduits au siècle des Lumières, le XVIII^e siècle, durant lequel la curiosité pousse les savants (les philosophes de la nature) à explorer les phénomènes de l'électricité, du magnétisme et de la lumière en particulier (Johnston, 2001). Pierre Bouguer (1698-1758) publie, en 1729, un *Essai d'optique sur la gradation de la lumière* et décrit dans un second ouvrage, *Traité d'optique sur la gradation de la lumière*, publié à titre posthume en 1760 par l'abbé de La Caille,

le premier photomètre visuel utilisant la loi de l'inverse carré de la distance. La même année, 1760, Johann Heinrich Lambert (1728-1777) publie un ouvrage intitulé *Photometria, sive de mensura et gradibus luminis colorum et umbrae*, qui énonçait les principes fondamentaux de la photométrie : loi de l'additivité des éclairagements, loi de l'inverse carré de la distance, loi du cosinus de l'éclairagement et de l'émission, etc. (Walsh, 1953). Mais la lumière n'était pas encore une grandeur mesurable au sens contemporain du terme, et il n'existait pas d'étalon de lumière auquel se référer.

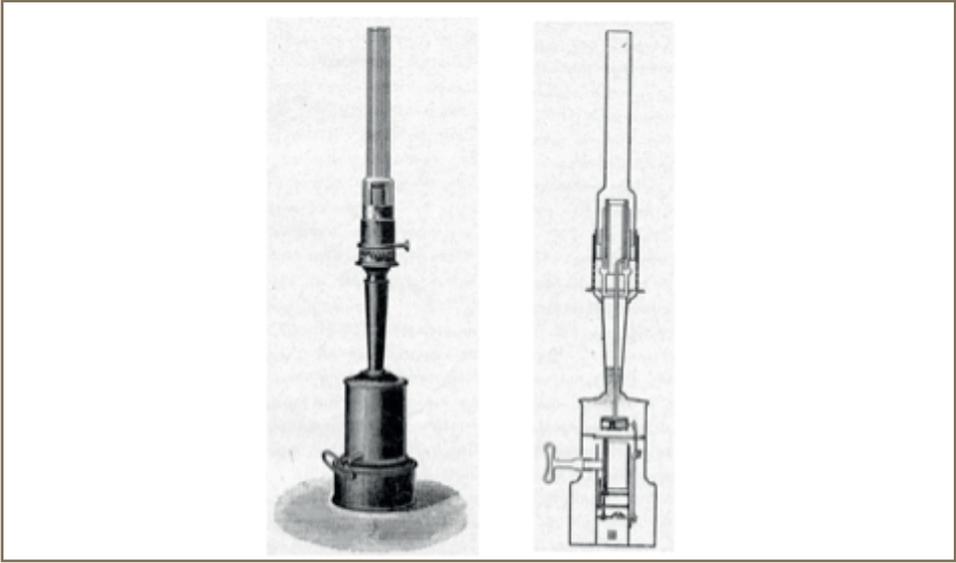
Le développement de l'éclairage au gaz dans les premières années du XIX^e siècle, et les recherches en astronomie, firent naître le besoin des mesures photométriques (Johnston, 2001). Le photomètre visuel, le seul existant à l'époque, permettant de faire seulement des comparaisons de deux sources de lumière, il a été nécessaire de définir un étalon d'intensité lumineuse sous la forme d'une source. Les premières sources utilisées pour cet usage étaient des bougies dont l'intensité lumineuse dépendait de nombreux paramètres : matière constituante, poids utilisé à l'heure, nature de la mèche, hauteur de la flamme, etc. Chaque pays possédait sa « bougie » étalon. Par exemple, en France, on utilisait la bougie stéarique, dite « de l'étoile », en Allemagne, la bougie de paraffine et en Angleterre, celle de blanc de baleine. Les valeurs de ces divers étalons étaient assez mal définies et la littérature fait état de divergences

de l'ordre de 20 %⁴. Cependant, faute de mieux, ils furent utilisés jusqu'aux environs de 1880 (Fleury, 1932).

En France, dès 1860, Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) et Henri Victor Regnault (1810-1878) préconisent les conditions d'emploi de la lampe Carcel à huile de colza comme source étalon, déterminant ainsi une nouvelle unité, le carcel, égale à environ 10 bougies (figure 1). Elle fut officiellement utilisée en France de 1880 à 1884. En 1884, une convention internationale adopte comme unité le violle (voir ci-dessous) qui est l'intensité lumineuse émise en direction normale par 1 cm² de la surface d'un bain de platine pur fondu, en train de se solidifier. Puis, en 1889, le Congrès international des électriciens définit une unité pratique, la bougie décimale, égale à 1/20 de violle. Malgré les accords internationaux, ces unités restent surtout utilisées en France, jusqu'en 1919

En Angleterre, les étalons qui succèdent aux bougies sont les lampes Vernon-Harcourt dont l'intensité était de 10 bougies anglaises. Quant aux Allemands, ils emploient de 1884 à 1948 la bougie Hefner, matérialisée par un type de lampe déterminé qui brûle de l'acétate d'amyle. Des étalons différents ayant été utilisés pendant de nombreuses années dans les principaux pays, il était nécessaire de déterminer le rapport des

⁴ Il n'y a pas de référence directe aux résultats de ces comparaisons. Cette information est donnée sous forme générale dans (Fleury, 1932, p. 8).



Fleury (1932)

Figure 1

Lampe carcel

utilisée comme étalon photométrique.

L'image de droite est une coupe de cette lampe montrant la petite pompe actionnée par un mouvement d'horlogerie qui permettait de contrôler l'apport de combustible à la mèche.

(Fleury, 1932, p. 15)

unités qu'ils définissaient. À diverses reprises, des comparaisons furent faites, notamment en France en 1906 par Alfred Perot (1863-1925) et Paul Janet (1863-1937) au Conservatoire national des arts et métiers, et par Raymond Jouaust (1875-1949) et Marcel Laporte (1889-1971) au Laboratoire central d'électricité. Les résultats furent les suivants : 1 bougie décimale française = 1 bougie anglaise = 1/0,9 bougie Hefner à mieux que 2 % près⁵.

Dès que les lampes à incandescence à filament de carbone, puis de tungstène, ont présenté des caractéristiques photométriques suffisantes, les unités ont été transférées sur des étalons secondaires de ce type. Le Laboratoire central d'électricité (Paris), le National Physical Laboratory (Teddington) et le National Bureau of Standards (Washington) comparèrent à plusieurs reprises leurs étalons à incandescence et décidèrent en 1909 d'adopter une unité commune, la « bougie internationale ». Cette nouvelle unité, dont l'application officielle en France date de 1919, était sensiblement égale à l'ancienne bougie

⁵ Les résultats de ces comparaisons ont été publiés en 1907 par le National Bureau of Standards (Hyde, 1907).

française mais elle était définie avec une meilleure « précision » (Terrien, 1972).

La première définition de l'intensité lumineuse, basée sur une source de lumière théorique parfaitement définie, a été adoptée par la IX^e Conférence générale des Poids et Mesures en 1948 et précisée par la XIII^e Conférence générale des Poids et Mesures en 1967. Son énoncé était le suivant : la candela, unité du Système international (SI) est l'intensité lumineuse, émise dans la direction perpendiculaire, d'une surface de $1/600\,000\text{ m}^2$ d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de $101\,325\text{ N/m}^2$. C'est cette définition qui était encore en vigueur en 1970, aux débuts de l'équipe de photométrie à l'INM.

Lors de la troisième session de la Commission internationale de photométrie (CIP) tenue à Zurich (Suisse) en juillet 1911, Hugo Strache (1865-1927) présenta une brève communication⁶ qui montrait que « *si le rayonnement d'une source est pondéré en rapport avec la*

sensibilité de l'œil, sa mesure en unité absolue est effectivement une mesure de la lumière émise par la source » (CIE, 1963, pp. 12-13). Cette communication ouvrait la voie à la photométrie moderne et aux travaux sur la détermination de la sensibilité spectrale de l'œil puisque cette information est indispensable pour effectuer la pondération. C'est en 1924, à sa session de Genève (Suisse), que la Commission internationale de l'éclairage, qui avait succédé à la Commission internationale de photométrie, adopta la courbe de sensibilité spectrale de l'œil, appelée à l'époque courbe de visibilité (actuellement fonction d'efficacité lumineuse spectrale) et notée $V(\lambda)$. C'est cette courbe, valable pour les niveaux d'éclairement élevés (vision photopique) (CIE, 1924, p. 67) qui est actuellement utilisée dans les mesures photométriques usuelles⁷.

⁶ La question de la mesure absolue des rayonnements optiques dont il est question dans la communication de H. Strache, a fait l'objet d'étude à peu près à la même époque. En effet, en 1893, K. Angstrom en Suède et F. Kurlbaum en Allemagne, énonçaient le principe de la radiométrie à substitution électrique et construisaient les premiers radiomètres capables de mesurer le flux d'un rayonnement directement en watt. Mais les performances limitées de ces appareils ne permettaient que la mesure des sources extrêmement intenses avec des incertitudes élevées de l'ordre de plusieurs pour cent. Ils n'étaient donc pas adaptés aux mesures photométriques qui s'appliquaient à des sources d'éclairage de faible puissance et dont l'incertitude des comparaisons au photomètre visuel était inférieure à 0,5 %.

⁷ Comme on peut le voir sur la figure 2, la fonction d'efficacité lumineuse spectrale définie en 1924 était donnée par une table de valeurs numériques couvrant le domaine spectral de 400 nm à 760 nm, avec un pas de 10 nm. Le nombre maximum de chiffres significatifs était de trois. Pour prendre en compte l'amélioration de la qualité des mesures et les progrès des moyens de calculs il a été nécessaire de préciser cette fonction. Les valeurs de bases adoptées en 1924 n'ont pas changé mais des valeurs intermédiaires ont été ajoutées par interpolation et des valeurs complémentaires ont été ajoutées par extrapolation. Cette nouvelle tabulation de $V(\lambda)$ a été adoptée en 1971. La fonction $V(\lambda)$ actuellement utilisée (valeurs adoptées en 1971) est tabulée sur le domaine spectral de 360 nm à 830 nm avec un pas de 1 nm et sept chiffres significatifs. Elle a été officiellement publiée sous la forme d'une norme ISO en 2005 (ISO 23539:2005 - CIE S010/E:2004, Joint ISO/CIE standard : Photometry, the CIE system of physical photometry). Le comité international des Poids et Mesures a officiellement reconnu l'utilisation de la courbe $V(\lambda)$ pour les mesures photométriques, une première fois en 1933 (valeurs tabulées de 1924) et une seconde fois en 1972 (valeurs tabulées de 1971).

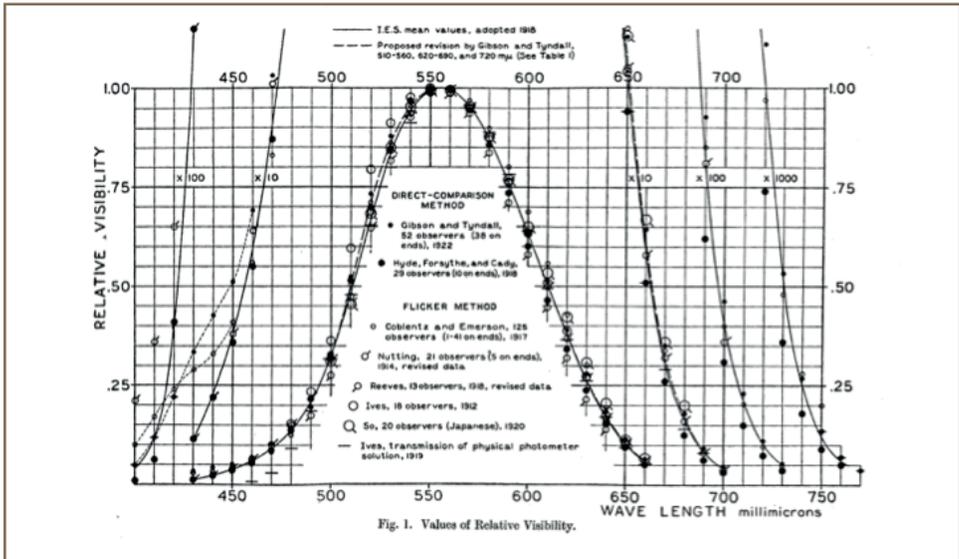
(4) La Commission internationale de l'Éclairage recommande, pour l'usage général, les valeurs suivantes, comme valeurs provisoires pour le facteur de visibilité.

Longueur d'onde ($m\mu$)	Facteur de Visibilité relative	Longueur d'onde ($m\mu$)	Facteur de Visibilité relative	Longueur d'onde ($m\mu$)	Facteur de Visibilité relative
400	0.0004	530	0.862	650	0.107
10	0012	40	954	60	061
20	0040	550	995	70	032
30	0116	60	995	80	017
40	023	70	952	90	0082
450	038	80	870	700	0041
60	060	90	757	10	0021
70	091	600	631	20	00105
80	139	10	503	30	00052
90	208	20	381	40	00025
500	323	30	265	750	00012
10	503	40	175	60	00006
20	710				

CIE (1924)

Figure 2

Valeurs numériques de la fonction $V(\lambda)$ publiées dans la quatrième décision de la Commission internationale de l'éclairage lors de la session de 1924 à Genève (extrait de la référence (CIE, 1924), p. 67)



CIE (1924)

Figure 3

Courbe de visibilité relative (fonction d'efficacité lumineuse spectrale), $V(\lambda)$, établie par Gibson et Tyndall à partir des valeurs disponibles en 1924

(extrait de la référence (CIE, 1924), pp. 232-238)

Les valeurs du facteur de visibilité adoptées par la CIE étaient issues d'un travail de compilation effectué par Gibson et Tyndall de tous les résultats disponibles. Ce travail, illustré par un graphique (figure 3) qui résumait l'ensemble de la compilation avait été présenté par Gibson (CIE, 1924, pp. 232-238).

Les travaux de Jules Violle (1881)

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, l'intérêt pour les mesures photométriques était essentiellement lié au développement de l'éclairage sous toutes ses formes, publique, commercial, industriel, privé, etc. L'amélioration des brûleurs à gaz ou des lampes à incandescence naissantes nécessitait des mesures de plus en plus exactes et un certain nombre de scientifiques de l'époque, et non des moindres, en France et dans d'autres pays, se sont investis dans ces sujets. C'est dans ce contexte que Jules Violle (1841-1923) est chargé par le physicien et académicien Éleuthère Mascart (1837-1908) des travaux sur la réalisation d'un étalon de lumière. En 1879, Jules Violle vient d'être nommé professeur à la faculté des sciences de Lyon⁸. Ces travaux le

conduisent à proposer en 1881, comme étalon photométrique, le rayonnement émis par une surface de platine à sa température de solidification (Fleury, 1932; Atten, 1994, p. 657). C'était la première tentative pour rendre l'étalon d'intensité lumineuse indépendant d'un objet matériel et le rattacher à un phénomène physique. Jules Violle deviendra professeur au Conservatoire des arts et métiers en 1891 et continuera à être très actif dans le domaine de la photométrie jusqu'à son décès en 1923. Il a notamment été le président du Comité national français de l'éclairage (CNFE), devenu aujourd'hui CIE-France.

Au cours d'expériences préliminaires, Violle mesura, à l'aide d'une pile thermoélectrique et d'un galvanomètre, le flux énergétique provenant d'un bain d'argent pur fondu : il montra alors que ce flux était constant pendant toute la durée de la solidification, une propriété importante pour pouvoir faire du métal fondu une source de lumière fiable.

Il étudia ensuite à l'aide d'un spectrophotomètre pour quatre longueurs d'onde différentes du spectre visible, le rayonnement de la lampe Carcel alors

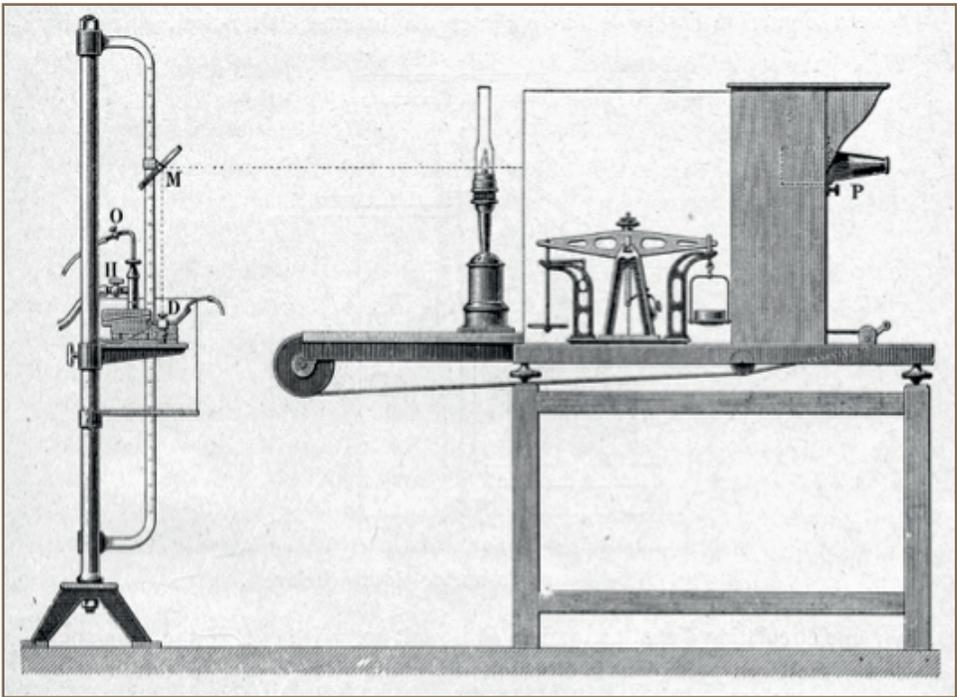
⁸ La faculté de Lyon a été très active dans le domaine de l'éclairage. Le professeur Théodore Vautier, élève de Jules Violle, organisateur de la Commission internationale de photométrie en 1900, puis de la Commission internationale de l'éclairage en 1913, était lui aussi professeur dans cette faculté. (Voir le *Bulletin mensuel de l'Association des anciens élèves*

de l'École centrale lyonnaise, n° 262, janvier-février 1931, pp. 68-70). On soulignera que les travaux sur la photométrie d'un certain nombre de grands scientifiques de l'époque sont restés confidentiels et apparaissent assez rarement dans leur biographie. C'est en particulier le cas pour Charles Fabry, qui a été président de la CIE de 1935 à 1939, président du Comité consultatif de photométrie (BIPM), et qui a écrit un remarquable traité de photométrie, et qui est surtout connu pour ses travaux en interférométrie.

utilisée en France comme étalon et celui d'une surface de platine à diverses températures. Ce faisant il put établir que le rayonnement émis par le platine à son point de solidification avait approximativement la même distribution spectrale que la lampe Carcel ce qui rendait possible, dans de bonnes conditions, la comparaison visuelle des deux rayonnements. En effet, pour pouvoir faire de bonnes comparaisons photométriques

au photomètre visuel il est nécessaire que les rayonnements émis par les deux sources aient sensiblement la même couleur, c'est-à-dire dans le cas des sources à incandescence, des distributions spectrales très voisines.

Enfin, Violle compara au photomètre visuel (à l'époque il n'en existait pas d'autre) l'intensité des deux sources grâce au montage représenté sur la



Fleury (1932)

Figure 4

Montage expérimental utilisé par Jules Violle
pour comparer le rayonnement émis
par une surface de platine à sa température de congélation
à celui d'une lampe Carcel

(Fleury, 1932, p. 55)

figure 4. La mesure le conduit au résultat suivant : l'intensité lumineuse du bain de platine à son point de solidification était égale à 20.8 carcels.

En 1884, la Commission internationale pour la définition des unités électriques adopta le violle comme unité de lumière, définie ainsi : un violle est la quantité de lumière émise dans une direction normale, par un centimètre carré de surface d'un bain de platine pur fondu, à sa température de solidification. Et, en 1889, le Congrès international des électriciens définit la bougie décimale, unité en usage à l'époque, comme le vingtième de l'unité violle. L'étalon violle étant d'un emploi très peu commode, les anciennes lampes à flamme et à incandescence restent alors encore utilisées comme étalons secondaires et étalons de travail.

Les travaux de Maurice Debure (1952)

Nous l'avons signalé, l'année 1948 marque un tournant dans la photométrie. Dans le cadre des missions confiées au LNE concernant la réalisation des étalons métrologiques nationaux, la « candela française » est élaborée au LNE, selon la définition de la ix^e Conférence générale des Poids et Mesures de 1948. Maurice Debure, le chef du service photométrie du LNE, et Norbert Leroy, un stagiaire, réalisent la candela en 1952 (Debure, Leroy, 1952). La définition de la candela est la suivante : l'étalon pri-

maire est constitué par un corps noir (radiateur intégral) au point de congélation du platine réalisé selon des recommandations précisées dans un document du BIPM associé à la définition⁹.

Pour permettre le passage de cet étalon de luminance à des étalons d'intensité lumineuse constitués par des lampes à filament de carbone, on formait sur l'écran d'un photomètre visuel, l'image de l'ouverture du corps noir¹⁰. La mesure s'effectuait par substitution, c'est-à-dire que l'une des plages du photomètre était éclairée successivement par l'image du corps noir et la lampe à étalonner, l'autre plage recevait la lumière d'une lampe tare.

La matérialisation de la candela est réalisée à partir d'un corps noir au point de congélation du platine : le rayonnement de ce corps noir a une couleur fixée, caractérisée par sa tem-

⁹ La partie corps noir de cet étalon (figure 5) était constituée par un tube de thorine pure de 2,5 mm de diamètre, 42 mm de profondeur et 0,3 mm d'épaisseur de parois, fermé par un diaphragme de 1,6 mm de diamètre et plongé dans un lingot de 280 g de platine contenu dans un creuset, également en thorine. L'ensemble était placé dans un second creuset de même matière afin d'assurer une bonne protection thermique. Le calorifugeage final était assuré par de la poudre de thorine maintenue par un cylindre de quartz. La fusion du lingot de platine était obtenue par chauffage à l'aide d'un four à induction HF fonctionnant à 600 kHz.

¹⁰ L'image est réalisée à l'aide d'un objectif achromatique de 160 mm de focale. L'angle solide du faisceau était défini par un diaphragme de 23 mm de diamètre, circulaire à un micromètre près.

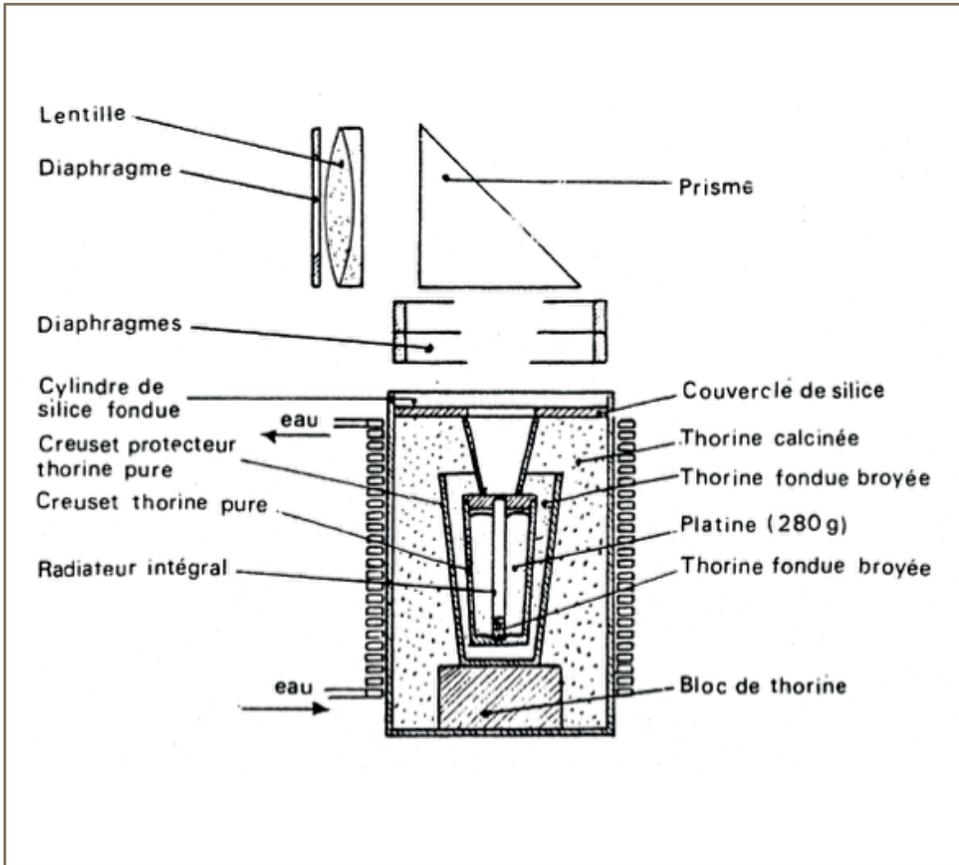


Figure 5

Réalisation de la candela par Maurice Debure (1952)

pérature de couleur¹¹ (qui dans ce cas est de 2042 K). Cette température de couleur est voisine de celle des anciens étalons à filament de carbone mais beaucoup trop basse pour l'usage courant. D'ailleurs, dès l'apparition des lampes à filament de tungstène, il avait été nécessaire de travailler avec des températures de couleur plus élevées. C'est pourquoi, afin de faciliter les comparaisons visuelles entre les lampes à filament de carbone qui conservaient la « bougie internationale » et les lampes à filament de tungstène, le Comité international des Poids et Mesures avait, en 1932, recom-

mandé l'emploi d'un filtre particulier en verre bleu, « élévateur » de température de couleur, dont quatre exemplaires, dits « filtres bleus internationaux », furent distribués aux laboratoires officiellement reconnus de l'époque, PTB (Allemagne), LCIE (France), NPL (Royaume-Uni) et NBS (États-Unis d'Amérique), sous le nom de filtre R 1-28, R 2-28, R 3-28, et R 4-28 respectivement. Ce filtre élève la température de couleur de 2042 K à environ 2357 K et permet, également, de passer de 2357 K à 2793 K (Debure et Leroy, 1952). Ces deux températures correspondent sensiblement aux conditions de fonctionnement des lampes à filament de tungstène dans le vide et sous atmosphère de gaz inerte¹².

C'est donc en employant ce filtre qu'on réalisa des lampes étalons qui maintenaient la candela à cette température de couleur très arbitraire de 2357 K. Toutefois, la matérialisation de la candela s'effectue actuellement le plus souvent à 2854 K. Cette valeur de température de couleur, tout aussi arbitraire que les précédentes, trouve son origine dans une lampe étudiée avec soin au National Bureau of Standards avant 1931 et qui était exceptionnellement bien connue. À partir de cette lampe de nom-

11 Lorsque l'on chauffe un corps capable de supporter de très hautes températures il émet de la lumière. La couleur et l'intensité de cette lumière évoluent en fonction de sa température. Aux environs de 600 °C il commence à devenir rouge sombre, puis, en fonction de l'augmentation de température la couleur évolue vers le rouge clair, le jaune pâle, puis vers différentes nuances de « blanc ». Il est donc possible de caractériser la couleur du rayonnement émis par une température que l'on appelle la température de couleur. Cette température de couleur est la température du corps noir (émetteur de rayonnement parfait) qui émet un rayonnement ayant la même couleur que le rayonnement considéré. Elle est généralement exprimée en kelvin (K). La température maximale de fonctionnement des lampes à incandescence est limitée par la tenue du filament aux hautes températures dans les conditions régnant à l'intérieur de l'ampoule. Les lampes à filament de carbone sous vide fonctionnent jusqu'aux environs de 2 100 K, celle à filament de tungstène sous vide jusqu'aux environs de 2300 K, celle à filament de tungstène sous atmosphère neutre jusqu'aux environs de 2800 K et les lampes à filament de tungstène sous atmosphère contenant des composés halogénés jusqu'aux environs de 3 100 K. Les sources de lumière utilisant d'autres modes d'émission de rayonnement, tubes fluorescents, lampes à décharges, lampes à diodes électroluminescentes, etc. peuvent émettre de la lumière ayant des températures de couleur beaucoup plus élevées. Ces températures de couleur sont en général comprises entre 2 800 K, et 6 500 K (lumière du jour).

12 Le filtre R 2-28 attribué à la France était encore, conservé à l'INM en 2007. Il avait été remis, en même temps que les lampes étalon, lors du transfert des étalons photométriques nationaux du LCIE au LNE. Voir : Procès-verbal de transfert des lampes étalons secondaires d'intensité lumineuse du Laboratoire central d'électricité au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des arts et métiers – 24 septembre 1943.

breuses lampes ont été ajustées à cette température de couleur et diffusées dans les principaux laboratoires de photométrie de l'époque.

À partir de la candela réalisée à 2042 K, Maurice Debure entreprit de produire, grâce à des lampes étalons à filament de carbone et de tungstène, l'échelle photométrique complète de l'époque, c'est-à-dire la candela à 2042 K, à 2357 K et à 2854 K, ainsi que le lumen à 2357 K et à 2793 K par des méthodes photométriques classiques, essentiellement visuelles (Debure et Leroy, 1952). C'est cette échelle qui était toujours utilisée en 1970 pour les différentes comparaisons internationales organisées par le BIPM et la diffusion des mesures photométriques en France.

La photométrie à l'Institut national de métrologie à partir de 1970

Développer une activité de photométrie à l'INM

Lorsque l'INM est instauré au sein du LNE à la fin des années 1960, 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 très jeune (néanmoins très compétente) technicienne, Evelyne

Pichard, unique personne du service. Les délais administratifs s'imposant, le successeur de Maurice Debure n'arrive qu'en février 1970 avec pour mission de redémarrer les activités de réalisation et de maintenance des étalons, d'une part, et de développer les activités d'étalonnages et d'essais, d'autre part. Les réorganisations nationales avec l'action du BNM en cours redessinent rapidement la géographie des activités et leur administration. L'INM est désormais chargé des activités de réalisation et de maintenance des références nationales sur quatre grandeurs fondamentales et il est transféré dans les locaux du Cnam, rue Saint-Martin. Le LNE est chargé des opérations d'étalonnage industriel et des essais.

Le transfert du Laboratoire de photométrie de l'INM dans les locaux du Cnam, en octobre 1970, a donné lieu à un partage du matériel. 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.

Conformément au découpage des missions, la priorité de l'INM à ce

moment-là a été de mettre en place, rapidement, un nouveau laboratoire de photométrie. L'équipe « Photométrie » qui s'installa dans les locaux de la rue Saint-Martin était constituée du responsable de l'équipe, Jean Bastie, d'une technicienne, Évelyne Pichard du LNE, Gabrielle Ferré, qui venait du service température du LNE où elle effectuait principalement des étalonnages de thermomètres de précision à mercure pour l'industrie.

Les activités du Laboratoire de photométrie avaient été temporairement élargies pour inclure également la pyrométrie optique: c'est-à-dire la mesure des températures élevées, supérieures à 800 °C, par méthodes optiques. L'utilisation de méthodes optiques très voisines de celles utilisées en photométrie justifiait ce rapprochement. 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.

L'équipe « Photométrie » s'est renforcée par la suite en intégrant les travaux réalisés en radiométrie ultraviolet (UV). Au début de l'INM, Patrick Fieffé-Prévoist développait, dans le cadre d'une équipe « Radiométrie UV », un arc à plasma d'hydrogène, étalon primaire de rayonnement pour l'ultraviolet (100 à 400 nm). Richard Croche, arrivé en 1978 dans l'équipe, fit son doctorat sur ce

sujet, renforçant cette ligne de recherche, et prit la suite de Fieffé-Prévoist au départ de celui-ci vers la fin de l'année 1979. Lorsque, à son tour, Richard Croche quitte l'INM, en 1982, l'équipe de radiométrie UV est rattachée à l'équipe « Photométrie » pour devenir l'équipe « Photométrie – Radiométrie ». Bernard Rougié qui, après sa thèse préparée dans l'équipe « Longueur » de l'INM, et soutenue en 1979, avait travaillé pendant quelque temps avec Richard Croche, prit en charge les mesures spectroradiométriques des sources de rayonnement dans le domaine spectral couvrant le proche ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Les différents montages expérimentaux qui avaient été réalisés d'une part, pour l'étude des sources ultraviolettes dans l'équipe radiométrie UV, et, d'autre part, pour l'étude des sources visible dans l'équipe photométrie furent placés sous sa responsabilité.

Le banc photométrique et le photomètre photoélectrique de l'Institut national de métrologie (1970-1972)

Dans ce contexte de démarrage et de développement de la photométrie, une des premières réalisations a été la mise en place d'un banc photométrique adapté aux missions de l'INM¹³. Ce banc

¹³ À l'origine, ce banc photométrique était installé dans l'un des sous-sols du bâtiment Dupin (l'ancien Pavillon des étalons lorsque le LNE était implanté dans les locaux du Cnam, avant son départ pour la rue Gaston-Boissier). Ce sous-sol avait abrité l'ancienne salle des masses du

photométrique était associé à des équipements de mesure électrique modernes bénéficiant des derniers apports de l'électronique : en utilisant des dispositifs photoélectriques, le signal lumineux est transformé en signal électrique, qu'on peut traiter grâce à l'électronique, et automatiser¹⁴. Cette installation a été étudiée pour prendre également en compte le développement qu'ont connu, dans les années 1950-1960, les nouvelles sources lumineuses¹⁵ ainsi que les détecteurs photoélectriques : en effet, le développement des semi-conducteurs dans l'industrie de

l'électronique, et en particulier celui du silicium, a eu des effets importants dans la réalisation de photorécepteurs robustes et faciles d'emploi, dont les propriétés ont été assez rapidement améliorées pour permettre de mesurer les rayonnements optiques dans de très bonnes conditions. C'est pourquoi, la photométrie visuelle a été abandonnée et remplacée par la photométrie photoélectrique (Bastie, 1974).

Le banc photométrique installé au Cnam était relativement court par rapport au précédent, 4 mètres contre 10 mètres auparavant. Mais cette longueur était suffisante parce que l'utilisation d'un photomètre photoélectrique ne nécessite plus l'utilisation simultanée de deux lampes. En outre l'équipe avait attaché un soin particulier à la qualité des rails et à l'étalonnage de la règle, pour minimiser l'incertitude sur les mesures de distance : l'incertitude était inférieure à $1/10^{\text{e}}$ de mm. Il avait été réalisé par les établissements Clavé, constructeur spécialisé dans les bancs optiques.

La chaîne de mesure photométrique ainsi réalisée permettait la comparaison de l'éclairement reçu par un détecteur photo-électrique lorsque celui-ci est éclairé successivement par les différentes lampes à étudier, placées dans des conditions de distance et d'orientation aussi proches que possible. Le banc photométrique portant des chariots équipés de mouvements fins permet le positionnement et le réglage des sources et du photomètre avec précision. Le détecteur était une photodiode au silicium dont la

LNE, et entre le départ du LNE et l'arrivée de l'INM, le Laboratoire des textiles. Lorsque les mesures radiométriques, spectroradiométriques et spectrophotométriques se sont développées, en 1981 il a été transféré dans les sous-sols du bâtiment Montgolfier.

14 En particulier, les anciennes mesures manuelles de tension électrique, par méthode potentiométrique, ont été remplacées par un voltmètre numérique et un multiplexeur de voies, permettant une automatisation relative des mesures. Le potentiomètre, un appareil de très haute performance pour l'époque, a été confié au musée du Cnam.

15 Dans les années 1960 les technologies utilisées dans la fabrication des lampes ont connu une évolution importante qui a conduit à l'apparition de nouvelles sources telles que les lampes aux halogénures métalliques et les lampes à vapeur de sodium. Cette évolution est passée relativement inaperçue du grand public car ces sources, en général de très forte puissance, étaient utilisées dans l'éclairage des grands espaces comme les stades, les chantiers ou en éclairage routier ou urbain. Seules les lampes au sodium basse pression utilisées en éclairage routier et qui donnaient une lumière jaune ont été remarquées car très désagréables pour les utilisateurs. On peut comparer l'évolution des lampes à cette époque à celle que nous vivons actuellement avec les lampes dites « basse consommation » qu'il serait plus correct d'appeler lampe « fluo-compacte », contraction de lampe fluorescente compacte, et les lampes à diodes électroluminescentes. Cette évolution génère beaucoup plus de débats parce qu'elle affecte l'éclairage domestique et l'éclairage dans le tertiaire.

courbe de sensibilité spectrale relative était très voisine de $V(\lambda)$ et la linéarité excellente lorsque l'impédance de charge est faible. Pour amplifier les courants faibles délivrés par le détecteur, tout en respectant cette dernière condition, un amplificateur opérationnel en montage transrésistance avait été utilisé, ce qui était également une innovation importante. La réponse du photomètre, ainsi que les caractéristiques électriques de la lampe, sont mesurées grâce à une chaîne d'acquisition de données automatique¹⁶.

Les bons résultats obtenus en photométrie photoélectrique ont été un jalon dans la construction des matériels et des savoir-faire au laboratoire. Ces éléments sont d'autant plus importants que les discussions au niveau international s'orientent dans les années 1970 vers une nouvelle définition des unités de base. Dans le cadre du Comité consultatif de photométrie du BIPM se prépare en effet la nouvelle définition de la candela, à partir des mesures radiométriques. La nouvelle définition est adoptée en 1979. Ce nouveau contexte a été intégré d'emblée dans les travaux qui ont suivi l'installation du banc photométrique : tout était préfiguré pour réaliser la candela selon la nouvelle définition lorsqu'elle serait adoptée unanimement.

¹⁶ Pour évaluer le gain en précision en passant des mesures visuelles aux mesures photoélectriques, une comparaison de lampes étalons ayant une température de couleur de 2042 K fut effectuée. L'étalonnage par la méthode visuelle était assuré avec une dispersion des mesures d'environ $2 \cdot 10^{-3}$, alors que l'accord des mesures photoélectriques était de l'ordre de $6 \cdot 10^{-4}$.

La nouvelle définition de la candela

La définition de la candela de 1948 avait plusieurs défauts, sur le plan théorique et expérimental. En particulier, elle n'avait pas apporté les améliorations escomptées aux mesures photométriques. Par ailleurs, les progrès réalisés au niveau des détecteurs physiques et dans les mesures radiométriques ont rendu possible une nouvelle définition de la candela selon les principes énoncés par Hugo Strache en 1911, et non plus sur une source étalon. La XVI^e Conférence générale des Poids et Mesures a adopté ce principe en 1979.

En termes techniques, la définition est la suivante : « *La candela est l'intensité lumineuse dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de 540 terahertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian* »¹⁷.

¹⁷ Elle fixe la valeur de la constante K_m à 683 lumens par watt sans incertitude. Cette valeur a été choisie pour assurer la continuité des mesures photométriques (Blevin et Steiner, 1975). D'autre part, cette définition ne mentionne pas de façon explicite $V(\lambda)$ ce qui permet d'envisager, éventuellement, des modifications de cette courbe ou l'utilisation d'autres courbes telle que $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique. En fonction du niveau de luminance on définit trois modes de fonctionnement du système visuel. La vision photopique est la vision de l'œil normal lorsqu'il est adapté à des niveaux de luminance d'au moins cinq candelas par mètre carré. Les cônes sont les principaux photorécepteurs actifs en vision photopique et la vision des couleurs est typique de ce mode de vision. La vision scotopique est la vision de l'œil normal lorsqu'il est adapté à des niveaux de luminance inférieurs à un millième de candela par mètre carré. Les bâtonnets sont les

Réalisation de la candela à l'Institut national de métrologie (1982-1985)

Dans le dispositif métrologique national, il incombait à l'INM de réaliser la candela nouvellement définie. Dans la continuité des travaux déjà entrepris, la candela a été réalisée entre 1982 et 1985. Contrairement à l'ancienne définition, la nouvelle ne donne aucune indication sur sa réalisation pratique. Chaque laboratoire était libre de choisir la méthode qui lui semblait la plus appropriée. La méthode retenue à l'INM est basée sur la mesure d'un éclairement énergétique, produit par la source dont on veut connaître l'intensité lumineuse, à travers un filtre ayant une transmission proportionnelle à $V(\lambda)$. Ce principe est schématisé sur la figure 6.

Cette liberté implique de faire des choix, et la conception du dispositif est un véritable défi technique pour lequel il faut : concevoir chaque instrument du dispositif, caractériser avec la plus grande précision possible chacun de ces instruments, déterminer toutes les sources d'incertitudes. Le dispositif choisi repose sur une accumulation déjà importante de savoir-faire au sein de l'INM, une expé-

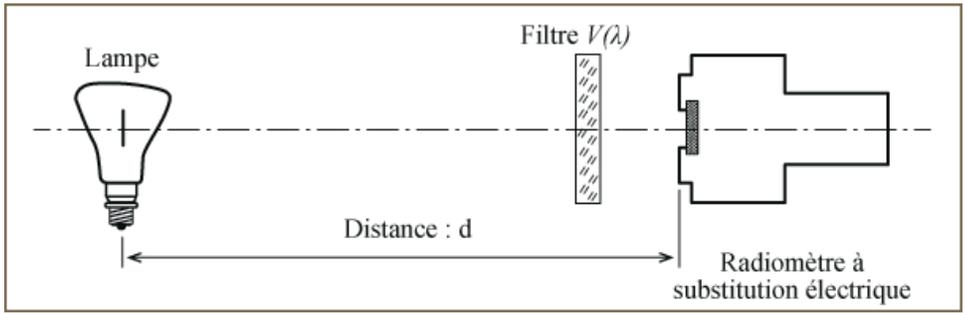
rience en matière de photométrie et elle a conduit à entretenir, développer, pousser ces acquis toujours plus loin.

Pour mettre en œuvre le principe retenu quatre opérations essentielles ont été nécessaires :

- Utiliser un radiomètre à substitution électrique parfaitement caractérisé pour la mesure de l'éclairement énergétique.
- Mesurer la transmission du filtre $V(\lambda)$.
- Déterminer la distance optique de la source au radiomètre et le diamètre du diaphragme placé devant le radiomètre pour passer de l'éclairement à l'intensité.
- De plus, comme le filtre n'est pas parfaitement identique à $V(\lambda)$, il faut également connaître la distribution spectrale relative de la source pour pouvoir effectuer les corrections liées à la non-conformité du filtre.

Pour la réalisation de cette candela le Laboratoire de photométrie possédait déjà le banc photométrique autorisant la mesure de distances avec une incertitude inférieure au $1/10^{\circ}$ de mm. Pour ne pas détériorer les bords très minces des diaphragmes, le laboratoire a développé une méthode de mesure du diamètre des diaphragmes, sans contact (Razet et Bastie, 2001). Il fallait également développer des mesures radiométriques basées sur la substitution électrique, construire un spectrophotomètre pour la mesure des transmissions de filtre (Lecollinet et Bastie, 1997) et un spec-

principaux photorécepteurs actifs en vision scotopique. Par rapport à la vision photopique, la vision scotopique est caractérisée par l'absence de perception des couleurs et par un décalage de la sensibilité visuelle vers les courtes longueurs d'ondes. La vision mésopique est la vision intermédiaire entre la vision photopique et la vision scotopique. En vision mésopique, les cônes et les bâtonnets sont actifs.



Jean Bastie, Cnam

Figure 6

Principe de réalisation de la candela utilisé à l'INM

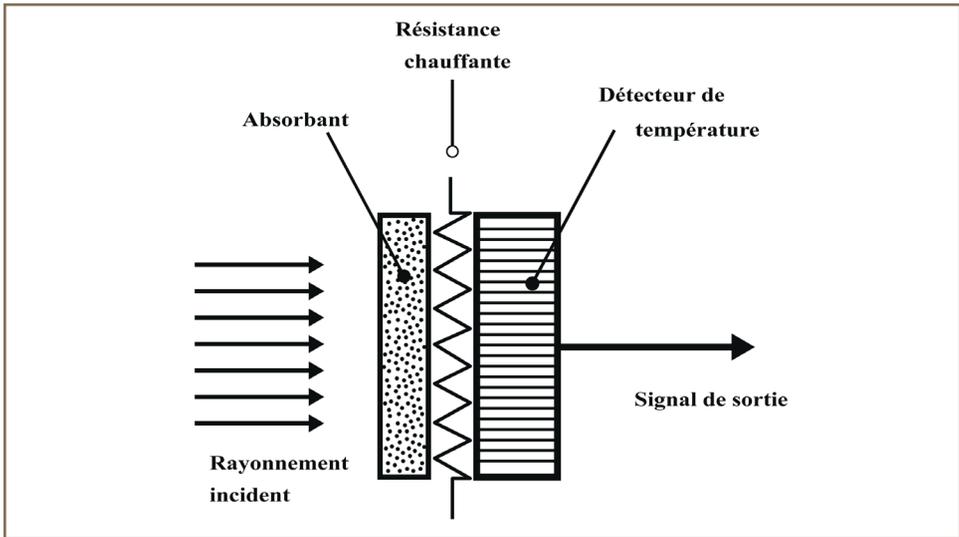
troradiomètre pour la mesure de la distribution spectrale des sources.

Chacune de ces quatre opérations, chaque nouveau morceau du dispositif, était un projet en soi qui a abouti à un banc de mesure spécifique et autonome. Ces bancs ont ensuite été utilisés pour faire d'autres mesures et étalonnages, tout à fait indépendants de la réalisation de la candela: instruments, bancs de mesure, savoir-faire sont venus grossir le patrimoine et l'expérience du laboratoire.

- *La radiométrie à substitution électrique (Bastie, 1987a)*

Au cœur du dispositif, présentons rapidement le principe de la radiométrie à substitution électrique, découvert simultanément, en 1893, par K. Angstrom en Suède et F. Kurlbaum en Allemagne. Il repose sur la comparaison entre deux modes de chauffage d'un même ré-

cepteur. Il s'agit de mesurer indirectement le rayonnement: on cherche la puissance électrique équivalente, c'est-à-dire celle qui produit le même effet que le rayonnement sur le thermomètre. Un radiomètre à substitution électrique (figure 7) se compose d'une partie susceptible d'absorber le rayonnement incident, d'une résistance chauffante et d'un dispositif thermométrique. Dans une première étape on applique sur la surface absorbante le rayonnement à mesurer qui chauffe le radiomètre (chauffage par rayonnement). Lorsque l'équilibre thermique est atteint on mesure à l'aide du dispositif thermométrique, l'élévation de température. Dans une seconde étape on supprime le rayonnement et on lui substitue, dans la résistance chauffante, une puissance électrique que l'on ajuste de manière à obtenir la même élévation de température (chauffage par effet Joule). En première approximation la puissance électrique mesurée est égale au flux du rayonnement incident (CIE, 1985).



Jean Bastie, LNE, Cnam

Figure 7

Schéma de principe du radiomètre à substitution électrique

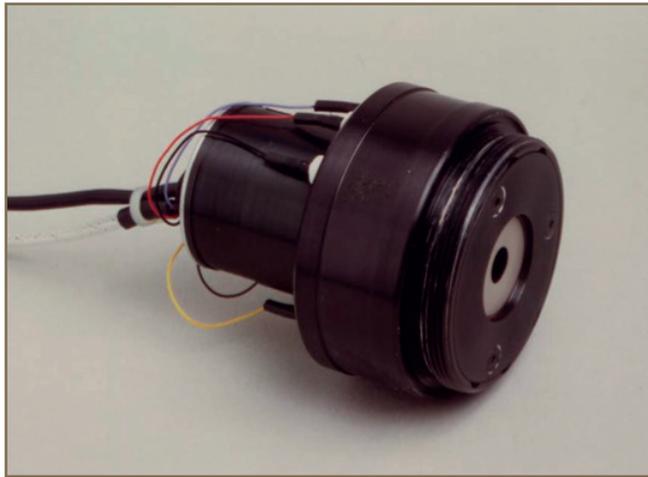
Dans les années 1980 de nombreux progrès avaient été réalisés pour ce type de détecteur et il était possible de trouver sur le marché quelques appareils de très bonne qualité, adaptés à la mesure des flux dans le domaine de la photométrie classique. L'INM a pu s'en équiper et en a effectué la caractérisation métrologique, nécessaire pour le montage de la candela¹⁸ (figure 8).

- *Réalisation de la candela (1^{re} version 1985)*

Les différents éléments nécessaires à la réalisation de la candela ayant été étudiés et caractérisés, le montage expérimental pour la mesure de l'intensité lumineuse d'une lampe a été installé sur le banc photométrique. Ce montage est présenté sur la figure 9.

De droite à gauche nous avons la lampe à étalonner, le modulateur (permettant d'envoyer alternativement le flux de la lampe et la puissance électrique de substitution sur le détecteur), le filtre $V(\lambda)$ et le radiomètre. Les appareils disposés près du radiomètre sont de haut en bas, la commande du modulateur, le réglage et la

¹⁸ La caractérisation du radiomètre nécessite la mesure du flux qui n'est pas absorbée par la surface. Pour réaliser cette mesure il a été nécessaire de construire un petit gonioréfectomètre simplifié. Ce travail a été effectué par Michel Pichon dans le cadre d'un travail pratique de cycle C du Cnam (Pichon, 1982). Avec cet appareil il était possible de faire des mesures de rayonnement optique à des niveaux de puissance de quelques dizaines de microwatts avec une incertitude estimée à $2,2 \cdot 10^{-3}$.



Service audiovisuel, Cnam

Figure 8

Radiomètre à substitution électrique Laser Precision Corp. Modèle RS 3940 utilisé à l'INM



Service audiovisuel, Cnam

Figure 9

Premier montage expérimental utilisé pour réaliser la candela conformément à la définition de 1979

mesure de la puissance électrique et la détection de l'égalité du flux optique et de la puissance électrique. L'incertitude obtenue avec cette installation était de $3,0 \cdot 10^{-3}$ (1σ) (Bastie, 1987b). Pour cette réalisation de la candela les montages et les mesures des différentes phases de l'expérience (caractérisation du radiomètre, mesure des filtres, étalonnage des lampes, etc.) ont été essentiellement effectués par Barbara Andasse (technicienne transfuge du LNE) en collaboration avec l'équipe en place, son responsable (Jean Bastie) et avec la collaboration de quelques élèves ingénieurs du Cnam dans le cadre de travaux pratiques de cycle C.

À partir du montage décrit ci-dessus deux ou trois lampes ont été soigneusement étalonnées. Puis ces lampes ont été utilisées pour en étalonner d'autres par comparaison, de manière à avoir deux groupes de cinq lampes de type différent qui conservent la candela. La diffusion de la candela dans la chaîne d'étalonnage du BNM (Bryden, 1970; BNM, 1973) était assurée à partir de ces lampes. Deux laboratoires étaient autorisés à se raccorder directement au laboratoire primaire, le Laboratoire national d'essais (LNE) et le Laboratoire central des industries électriques (LCIE). Ces deux laboratoires, à leur tour, diffusaient la candela vers les utilisateurs qui, pour le LCIE étaient plutôt des laboratoires industriels, et pour le LNE des laboratoires de recherche publics et privés. Dans les années 1980, l'industrie de l'éclairage en France était très active et il existait un certain nombre de laboratoires de recherche privés tra-

vaillant dans ce domaine. Le besoin de formation en ce qui concerne la mesure de rayonnements optiques était corrélé à ces intérêts économiques et industriels. L'École supérieure d'optique avait dans son cursus un cours assuré par François Desvignes qui traitait essentiellement des capteurs de rayonnement optique et un peu de photométrie. Le LCIE, dans le cadre de son service photométrie dirigé par Gérard Bertrand organisait une à deux fois par an des sessions de formation dénommées FORPHESCO (Formation en photométrie et colorimétrie) d'une durée d'environ une semaine et qui regroupait une dizaine de personnes venant essentiellement de l'industrie de l'éclairage (laboratoire, production et technico-commerciaux). Le responsable du service photométrie de l'INM intervenait comme enseignant dans les sessions FORPHESCO.

• *Comparaison internationale*

Tout l'effort porté sur la réalisation de la candela s'inscrit dans une perspective internationale, ce qui signifie comparaison avec les autres étalons produits dans d'autres laboratoires. On peut même dire que ces comparaisons ont été organisées dès les débuts de la photométrie et elles se sont poursuivies d'une manière assez régulière. Dans cette pratique, les photométristes ont été des précurseurs et désormais tous les domaines de la métrologie sont concernés. En effet, dans le cadre de l'Arrangement de reconnaissance mutuelle du CIPM (MRA) mis en place par le BIPM le 14 octobre 1999, les laboratoires partici-

pants (actuellement 97 laboratoires appartenant à 53 pays différents) s'engagent à reconnaître les certificats d'étalonnage qu'ils émettent comme étant équivalents à ceux qu'ils émettraient. Cette équivalence des certificats s'appuie sur l'organisation de comparaisons clés, les *Key Comparisons* dont les résultats sont disponibles dans une base de données maintenue par le BIPM et accessible en ligne.

Suite à la réalisation de la candela selon la définition de 1979, dans les principaux laboratoires de photométrie nationaux, le BIPM a organisé une comparaison internationale d'intensité lumineuse en utilisant comme étalon de transfert des lampes à incandescence. Cette comparaison s'est déroulée entre la fin 1985 et 1986 : les résultats obtenus par l'INM, bien que très satisfaisants n'étaient pas parmi les meilleurs. Cette situation a donc amené le laboratoire à envisager une nouvelle matérialisation de la candela, en orientant les recherches préalables sur les éléments du dispositif qui donnaient les plus grandes composantes de l'incertitude.

Première amélioration de la candela à l'Institut national de métrologie (1994-1997)

La nouvelle matérialisation de la candela à l'INM mise en chantier repose sur trois perspectives de développement en vue d'un gain en incertitude de mesure : l'installation d'un radiomètre à substitution électrique cryogénique,

l'amélioration des performances dans les mesures de la sensibilité spectrale des détecteurs et de la transmission des filtres.

• Le radiomètre à substitution électrique cryogénique (Touyar et al., 1993)

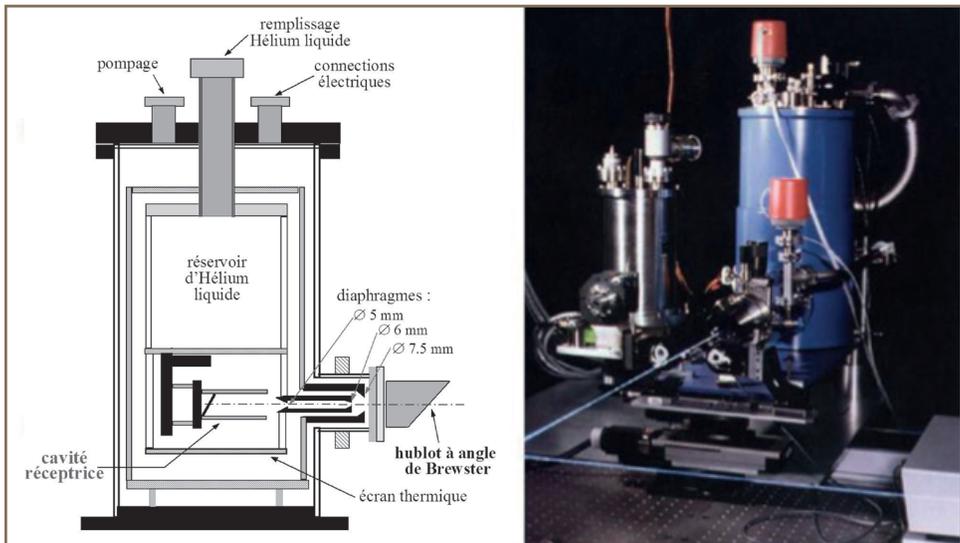
Dans les années 1990 la radiométrie à substitution électrique a connu une amélioration très importante avec le développement des radiomètres à substitution électrique cryogénique. Le principe de base de ce type de radiomètre reste le même mais le fait de travailler à une température voisine de celle de l'hélium liquide (vers 4 K, soit -269 °C) permet de minimiser les principales causes d'incertitude. En effet, dans ces conditions la capacité calorifique du cuivre devient très faible ce qui permet de remplacer la surface absorbante du radiomètre par une cavité qui piège la quasi-totalité du rayonnement, tout en gardant un temps de réponse raisonnable en détection. De plus, la conductivité thermique est considérablement augmentée ce qui minimise fortement la différence de propagation de la chaleur entre les deux modes de chauffage (par rayonnement et par effet Joule). Enfin, l'utilisation de fils supraconducteurs rend négligeable l'apport de chaleur par les fils d'alimentation de la résistance chauffante.

Utiliser l'hélium liquide, en revanche, a un inconvénient expérimental : le radiomètre doit être placé sous vide, dans un cryostat. Cela impose l'utilisation d'un hublot entre la source de

rayonnement et la cavité du radiomètre, hublot dont il faut connaître les propriétés de transmission. La position de la cavité absorbante au fond du cryostat nécessite l'utilisation de faisceaux laser comme source de rayonnement.

Cet obstacle technique a été une nouvelle occasion d'étudier et de développer des montages expérimentaux spécifiques pour caractériser le radiomètre cryogénique. L'équipe a en particulier développé un système de mesure de la transmission du hublot dans des conditions aussi proches que possible des conditions d'utilisation, et un dispositif pour la mesure de l'absorption de la cavité (Touayar *et al.*, 1998). L'installation, la mise en œuvre et la caractérisation du ra-

diomètre cryogénique ont été assurées par Oualid Touayar avec l'aide de Christophe Brigout, élève du Cnam, qui préparait son mémoire d'ingénieur. Avant de rejoindre l'équipe « Photométrie – Radiométrie » en tant qu'ingénieur de recherche Oualid Touayar avait préparé et soutenu sa thèse à la Chaire d'instrumentation du Cnam sous la direction de Claude Morillon. Par la suite il a obtenu un poste de maître de conférences à l'INSAT de Tunis, dans son pays d'origine, où il a développé un laboratoire de mesure de rayonnement optique en collaboration avec l'INM. À son départ c'est Jeanne-Marie Coutin-Desbancs qui a poursuivi le travail en élargissant le domaine spectral d'utilisation du radiomètre cryogénique. Elle avait préparé et soutenu sa thèse dans l'équipe



Service audiovisuel, BIPM (autorisation aimable)

Figure 10

a/ coupe schématique d'un radiomètre cryogénique

b/ photo de deux radiomètres cryogéniques

photométrie-radiométrie de l'INM, thèse dont le sujet était l'utilisation des diodes lasers dans la métrologie des rayonnements optiques.

- *La caractérisation des détecteurs*

L'utilisation du silicium dans la fabrication des composants électroniques a rapidement conduit à la réalisation de photodétecteurs de type photodiode, ou phototransistor¹⁹ utilisant ce matériau. Les premières photodiodes au silicium avaient une surface réceptrice assez réduite et leur stabilité à long terme était peu satisfaisante pour des applications métrologiques. Vers la fin des années 1980, la société japonaise Hamamatsu a réussi à mettre au point des photodiodes de forme carrée, de surface active de 1 cm², présentant une stabilité à long terme remarquable ce qui a révolutionné les mesures dans le domaine des rayonnements optiques sur le domaine spectral de 300 nm à 1 200 nm. Mais pour être utilisées efficacement ces photodiodes avaient besoin d'être caractérisées. Les deux principaux paramètres à mesurer étaient :

- la linéarité, c'est-à-dire la proportionnalité entre le flux arrivant sur la photodiode et le courant de sortie²⁰ – (Bastie et Lecollinet, 1993) (Lecollinet et Bastie, 1993 et 1995).

¹⁹ À l'époque ces photodétecteurs étaient appelés « photopiles » pour les différencier des photodiodes à vide utilisées pour certaines applications en photométrie.

²⁰ Le principe de la mesure de la linéarité repose sur

- la sensibilité spectrale²¹ – (Bastie et Andasse, 1991a)

Dès le milieu des années 1970 deux montages spécifiques ont été étudiés et réalisés pour mesurer ces caractéristiques et suivre leur évolution dans le temps. Les premiers montages expérimentaux ont été réalisés par Barbara Andasse en collaboration avec Jean Bastie. Au départ de Barbara Andasse vers des fonctions administratives au sein de l'INM, Paulette Lecollinet a pris sa suite. Cette dernière avait travaillé dans l'équipe « Masses-pressure » de l'INM où elle avait préparé son mémoire d'ingénieur Cnam. Puis, après quelques années de mise en disponibilité, elle est revenue et a été affectée à l'équipe « Photométrie – Radiométrie » en qualité d'ingénieur

la règle de l'addition des flux. Pour cela on envoie sur le détecteur un premier flux puis un second flux et enfin les deux flux simultanément (addition des deux flux). Si la réponse du détecteur lorsqu'il reçoit les deux flux est égale à la somme des réponses pour chacun des flux séparés, le détecteur est linéaire. Si ce n'est pas le cas il est possible de calculer un facteur de correction pour corriger les mesures. Deux montages ont été étudiés et réalisés successivement pour suivre l'évolution des détecteurs qui, avec les progrès techniques dans leur réalisation, étaient linéaires à des niveaux de flux de plus en plus élevés.

²¹ Pour mesurer la sensibilité spectrale d'un détecteur il faut le comparer, longueur d'onde par longueur d'onde, à un détecteur de référence non sélectif, c'est-à-dire dont la sensibilité est indépendante de la longueur d'onde. Les détecteurs de référence utilisés sont des détecteurs thermiques dont le revêtement absorbant est choisi de manière à absorber toutes les longueurs d'onde de la même manière sur le domaine spectral considéré. Comme pour la détermination de la linéarité des détecteurs, plusieurs montages successifs ont été utilisés, ainsi que plusieurs types de détecteurs de référence pour caractériser l'évolution des détecteurs, au cours du temps.

de recherche. À son départ à la retraite, en 2003 elle a été remplacée par Fatima Tayeb-Chandoul qui venait de réussir le concours de technicienne de laboratoire.

- *Réalisation de la candela – 2^e version en 1997* (Katnah et al., 1999a et 1999b)

Avec l'accumulation de techniques et d'instruments caractérisés métrologiquement (radiomètres à substitution électrique cryogénique, détecteurs au silicium, etc.), il devenait envisageable de lancer une nouvelle réalisation de la candela. Pour cette réalisation le choix s'est porté sur la fabrication de photomètres de référence étalonnés par rapport au radiomètre cryogénique. Cette étude a constitué le travail de doctorat d'Achraf Katnah, étudiant syrien venu à l'INM dans le cadre d'une collaboration franco syrienne : la thèse a été dirigée par Marc Himbert, alors directeur de l'INM et titulaire de la Chaire de métrologie au Cnam, et soutenue en 1997.

Ces photomètres étaient constitués d'un détecteur au silicium dont la sensibilité spectrale absolue avait été déterminée en utilisant le montage de mesure de sensibilité spectrale relative décrit précédemment et le radiomètre cryogénique pour transformer les mesures de sensibilité spectrale relative en mesure de sensibilité absolues. Devant ce détecteur était placé un filtre, dont la transmission soigneusement mesurée, donnait à l'ensemble filtre-détecteur une sensibilité très proche de $V(\lambda)$, et devant

le filtre un diaphragme pour déterminer le flux arrivant sur le détecteur. Tous ces éléments étaient placés à l'intérieur d'un manchon dont la température était contrôlée par une circulation d'eau à température constante.

Par rapport à la première candela, le fait de placer le diaphragme devant le filtre permettait d'améliorer la mesure de la distance de la source au photomètre. En effet, la distance optique dans cette configuration égale la distance mécanique puisqu'il n'y a pas à prendre en compte l'épaisseur de verre traversée par la lumière. De plus la sensibilité des détecteurs au silicium étant beaucoup plus grande que celle des radiomètres à substitution électrique il est, d'une part, possible de travailler à plus grande distance ce qui améliore l'incertitude sur cette grandeur et, d'autre part, le rapport signal sur bruit des mesures est nettement amélioré.

L'incertitude obtenue sur cette réalisation de la candela était désormais de $3,0 \cdot 10^{-3} (1\sigma)$: elle est sensiblement la même que celle de la réalisation précédente, en dépit des progrès réalisés pour la mesure du flux énergétique grâce à l'utilisation du radiomètre cryogénique. À un premier niveau, cela montre toute la difficulté des mesures métrologiques et de la maîtrise de l'incertitude. L'absence de gain en incertitude s'explique par le fait que le nombre de mesures complémentaires pour caractériser les détecteurs au silicium entraîne la prise en compte de nouvelles causes d'incertitude d'une part, et, d'autre part, il n'y a pas eu de

gain significatif d'incertitude sur la mesure du facteur de transmission des filtres pour réaliser l'adaptation spectrale des détecteurs au silicium. De plus un nouveau phénomène est à prendre en compte. Il s'agit du phénomène d'inter-réflexion entre la surface du détecteur au silicium et le filtre qu'il est très difficile de quantifier avec précision.

Deuxième amélioration de la candela à l'Institut national de métrologie (2001-2005)

Sur ces constats, et pour poursuivre les travaux, il était impératif de réviser, étudier et caractériser à nouveau le détecteur. Les détecteurs au silicium, comme indiqué précédemment, ont un facteur de réflexion relativement élevé, c'est-à-dire qu'ils n'absorbent qu'une partie du rayonnement incident. Ce facteur de réflexion, variable d'un type de détecteur à un autre, varie également en fonction de la longueur d'onde. Il est couramment de l'ordre de 40 % dans le domaine visible. Cette réflexion étant spéculaire il a été possible de réaliser des détecteurs pièges, c'est-à-dire des détecteurs dans lesquels la lumière subit plusieurs fois le phénomène d'absorption-réflexion à la surface de détecteurs au silicium judicieusement choisis et disposés.

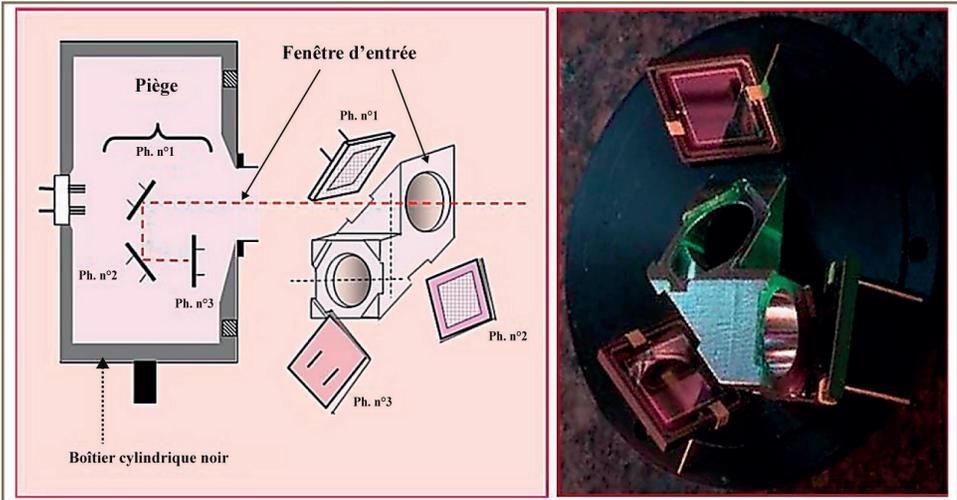
- *Caractériser le détecteur piège*

Le type le plus classique de détecteur piège est celui à trois photodiodes dans lequel le rayonnement incident arrive sur

une première photodiode inclinée à 45° par rapport à l'axe du faisceau (figure 11). Le rayonnement non absorbé est envoyé sur une seconde photodiode également inclinée à 45° puis sur une troisième qui reçoit le rayonnement perpendiculairement à sa surface. À partir de cette troisième photodiode le rayonnement restant revient vers la seconde puis la première photodiode. Le phénomène d'absorption-réflexion se produit donc cinq fois donnant une absorption quasi totale du détecteur piège (supérieure à 99 %). La disposition géométrique des photodiodes à l'intérieur du détecteur impose des contraintes fortes sur l'utilisation pratique de ce type de détecteur. En particulier les faisceaux doivent avoir une ouverture angulaire faible et le diamètre du faisceau doit être faible lui aussi. L'apparition sur le marché de photodiode au silicium de grande taille (18 x 18 mm²) a permis d'envisager la réalisation de photomètre utilisant des détecteurs pièges dans de bonnes conditions.

- *Réalisation de la candela – 3^e version en 2005 (Obein et al., 2007)*

À partir de détecteurs pièges caractérisés en linéarité et en sensibilité spectrale, mais améliorés au fil du temps, de nouveaux photomètres ont été construits selon le schéma ci-dessous (figure 12). On retrouve les éléments classiques d'un photomètre, le filtre qui permet d'avoir une sensibilité spectrale aussi proche que possible de $V(\lambda)$ et un diaphragme pour contrôler le flux entrant dans le photomètre. Ces deux éléments, particulièrement sensibles



Service audiovisuel, Cnam

Figure 11

Schéma d'un piège optique réalisé avec des photodiodes

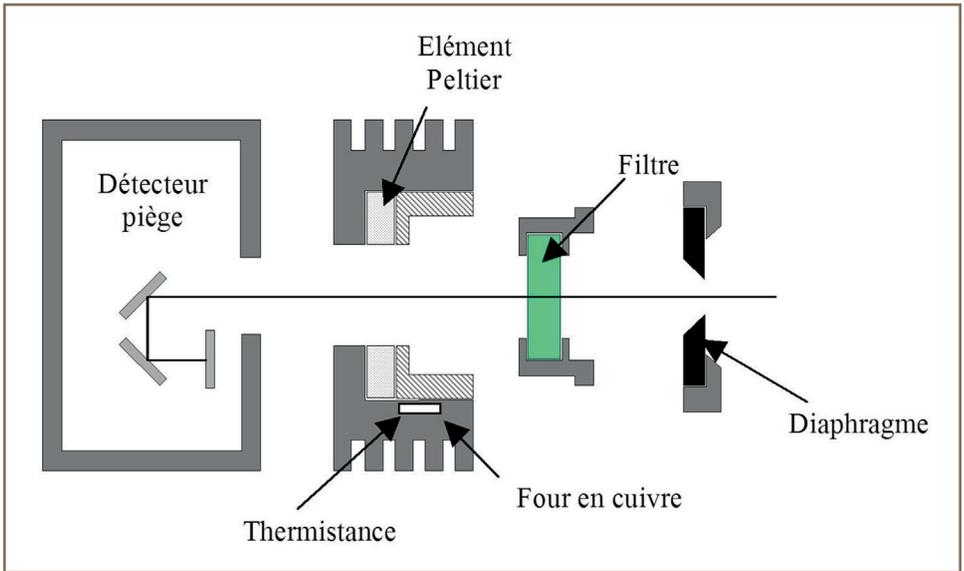
à la température, sont placés dans un four dont la température est régulée un peu au-dessus de la température ambiante²².

L'incertitude sur la nouvelle réalisation de la candela est de $2,2 \cdot 10^{-3}$. Ce qui représente une légère amélioration par rapport à la réalisation précédente et permet de situer la candela « française » parmi les bonnes réalisations au niveau

international. En effet, les incertitudes annoncées par les laboratoires participants aux comparaisons internationales organisées par le BIPM s'échelonnent de $1 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-3}$. La principale composante de l'incertitude, qui représente à elle seule la moitié de l'incertitude totale, est celle liée à la mesure de la transmission des filtres $V(\lambda)$. Les travaux effectués sur plusieurs années dans ce domaine n'ont pas permis des progrès aussi spectaculaires que ceux obtenus dans les domaines de la radiométrie et de la caractérisation des détecteurs.

Cette réalisation de la candela a été effectuée par Laura Patricia Gonzalez Galvan dans le cadre de son travail de thèse de doctorat. Elle était venue à l'INM dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire national du Mexique, le

²² L'effet Peltier est un effet thermoélectrique, découvert en 1834 par le physicien Jean-Charles Peltier. Il est utilisé pour produire des systèmes de régulateurs (par extraction ou apport) de chaleur. L'effet se produit entre deux pièces en matériaux conducteurs ou semi-conducteurs, de nature différente, en contact par des jonctions. Dans un circuit à deux jonctions, mis sous tension électrique, une des jonctions chauffée, pendant que la seconde refroidit (et permet d'extraire ou d'apporter de la chaleur d'un système connecté à cet élément Peltier en fonction du sens du courant et donc de réaliser un système de régulation de la température).



Laura Patricia Gonzalez (autorisation aimable)

Figure 12

Conception générale des photomètres

Photographie de l'un des photomètres réalisés



Laura Patricia Gonzalez (autorisation aimable)

CENAM (Centro Nacional de Metrologia) et l'INM. À son retour au CENAM elle a pris la responsabilité du Laboratoire de photométrie de cet établissement.

Réalisation du lumen à l'Institut national de métrologie

La candela est l'une des unités de base du Système international d'unité (SI), il entrerait donc dans les missions de l'INM de réaliser sa matérialisation avec une incertitude aussi faible que possible. Mais l'unité photométrique qui intéresse le plus les utilisateurs est le lumen. Elle est matérialisée par des lampes étalons dont on connaît le flux total émis dans toutes les directions de l'espace autour de la lampe. Pour réaliser ces lampes étalons il faut donc mesurer l'intensité lumineuse dans un grand nombre de directions autour de la lampe et totaliser ces mesures en fonction de l'angle solide pour obtenir le flux total cherché.

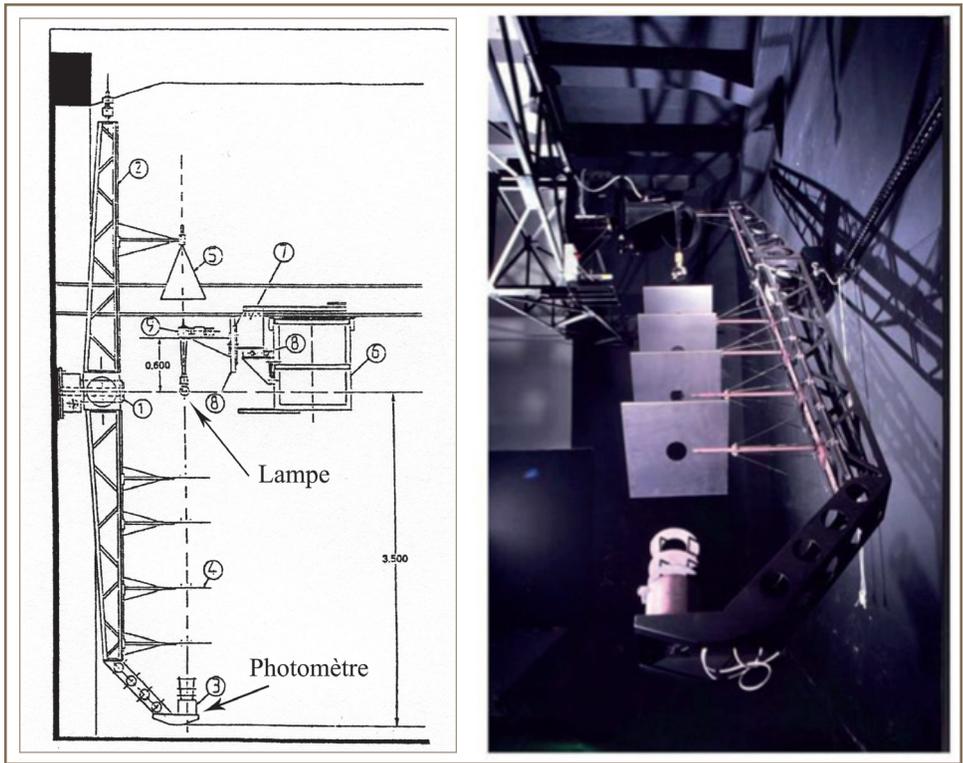
Pour réaliser ces lampes étalons de flux lumineux l'INM a étudié et construit un goniophotomètre de grande dimension (le préfixe « gonio » indiquant qu'il s'agit de faire des mesures selon différents angles). En effet pour que la mesure de l'intensité soit correcte il est nécessaire d'avoir une distance suffisamment grande entre la source et le détecteur.

Deux contraintes ont présidé à la construction du goniophotomètre : la taille du local dans lequel il a été installé et la nécessité de la grande dimension.

Le sous-sol du bâtiment Montgolfier, avec une hauteur sous plafond de plus de sept mètres étant disponible au moment du lancement du projet, une partie fut attribuée à l'INM pour l'installation du Laboratoire de photométrie (banc photométrique et goniophotomètre). Pour tenir compte de ces contraintes, l'instrument a ces caractéristiques : une distance de la source au détecteur de 3,40 m, un diamètre de détecteur de 60 mm correspondant sensiblement à une ouverture angulaire de 1° , une vitesse de rotation de $4^\circ/\text{s}$ et une incertitude sur le positionnement angulaire de $0,02^\circ$. La mesure du flux lumineux utilise 3 600 valeurs de l'intensité lumineuse acquises en une heure environ. L'incertitude globale sur les mesures du flux lumineux est de $5 \cdot 10^{-3}$ (1σ) (Bastie *et al.*, 1991b).

Cet instrument a été étudié en collaboration avec le responsable « mécanique » de l'INM, René Foucart qui a également assuré la supervision de la réalisation. L'appareil a été installé en 1982. La caractérisation et l'exploitation de l'instrument ont été effectuées par Barbara Andasse. Les principaux travaux effectués avec cet instrument ont été, d'une part, la réalisation d'un groupe de lampes étalons de flux lumineux (le « lumen français ») et, d'autre part, l'étalonnage d'un certain nombre de lampes étalons de transfert, pour la chaîne d'étalonnage du BNM (et d'autres laboratoires nationaux étrangers).

Lors du transfert de l'INM à Saint-Denis, dans les nouveaux locaux de la rue



Jean Bastie, LNE, Cnam ; Service audiovisuel, Cnam

Figure 13

Le goniophotomètre de l'INM

du Landy, une salle spéciale a été aménagée pour accueillir le goniophotomètre. Le remontage de l'appareil dans les nouveaux locaux a été l'occasion d'effectuer une révision complète de la partie mécanique de l'appareil et une modernisation de la partie électronique et informatique. Actuellement (en 2015) l'instrument est toujours opérationnel et utilisé pour la réalisation des étalons de transfert de flux lumineux dans la chaîne d'étalonnage et la participation aux comparaisons internationales.

Conclusion

L'équipe de photométrie à l'INM a poursuivi, depuis 1970, une longue histoire entamée avec Jules Violle, puis développée avec Maurice Debure et la première candela « française » en 1952. Ces temps longs sont nécessaires dans une activité de photométrie, et de métrologie en général. Perfectionner les dispositifs, revoir les unités, cerner toutes les sources d'incertitudes, demande beaucoup de temps, et des savoir-faire qui se

construisent dans le temps. Les discussions à l'échelle internationale au sein du BIPM, autant que les avancées technologiques de tous horizons, ont amené des modifications profondes dans la conception de la définition de l'unité de base pour les mesures photométriques. Le Laboratoire de photométrie a orienté ses choix et réalisés ses travaux en intégrant pleinement ces deux grandes dynamiques.

En particulier, la définition de la candela adoptée en 1979 a remplacé la source étalon d'intensité lumineuse « idéale » utilisée jusqu'alors, par la fixation d'une équivalence entre l'unité de flux lumineux, le lumen, et l'unité de puissance, le watt. La réalisation de la candela suivant cette nouvelle définition nécessitait la mise en place d'un laboratoire capable de réaliser des mesures radiométriques, spectroradiométriques et spectrophotométriques avec une très faible incertitude. Les principaux montages expérimentaux mis en place ont été : un banc photométrique, des photomètres photoélectriques, un banc de mesure de la linéarité des détecteurs, un banc de mesure de la sensibilité spectrale des détecteurs, un banc de mesure de la distribution spectrale des sources de rayonnement, un banc de mesure du facteur de transmission des filtres, un radiomètre à substitution électrique à température ambiante, un radiomètre à substitution électrique cryogénique et un banc de mesure du diamètre des diaphragmes sans contact. Tous ces bancs de mesure ont évolué au cours du temps pour améliorer les résultats au fil de progrès techniques

provenant de multiples domaines (mécanique, optique, électronique, etc.).

On a vu qu'entre 1985 et 2005, le Laboratoire de photométrie de l'INM a réalisé trois générations de photomètres étalons. Le gain en incertitude de ces différentes réalisations a été très modeste mais c'est sur la facilité d'utilisation et de caractérisation des photomètres que le gain a été intéressant. D'autant plus que les missions de l'INM sont aussi de diffuser, de disséminer les références, candela et lumen en particulier, auprès des utilisateurs : industriels, laboratoires de recherches, métrologie légale, etc. La dissémination a pris également d'autres canaux, en particulier celui de la formation et de la collaboration : formation de chercheurs, par des doctorats encadrés dans le laboratoire, collaborations avec des laboratoires de métrologie en développement (Syrie, Mexique, par exemple), tout cela fait partie de la dissémination des savoir-faire. Le fait que l'INM soit inséré dans le Cnam, établissement qui a vocation à former et disséminer les savoir-faire technologiques constitue un atout. En témoignent les nombreux élèves en formation au Cnam, en cycle C, qui ont participé à tel ou tel montage ou expérience, et qui ont pu intégrer l'INM pour quelques-uns ou bien partir et faire valoir leur savoir-faire dans d'autres institutions. Avec ce passé et cet héritage, la réorganisation de la métrologie avec la création du Laboratoire commun de métrologie entre le LNE et Cnam ouvre une nouvelle page de l'histoire de la photométrie en France.

Bibliographie

Atten, M., (1994). « Jules Violle (1841-1923), Professeur de physique appliquée aux arts. » In Fontanon, C. et Grelon, A. (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris: INRP/Cnam (Collection Histoire biographique de l'enseignement, 2 volumes), pp. 656-666.

Bastie, J. (1974). « La photométrie photoélectrique à l'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers. » *Bulletin du BNM*, n° 15.

Bastie, J., Tubiana, B. et Janest, A. (1980). « Étude de solutions étalons pour le contrôle des spectrophotomètres. » *Bulletin du BNM*, n° 42, octobre 1980, pp. 6-11.

Bastie, J. (1987a). « Les références radiométriques à l'INM. Radiométrie à substitution électrique. » *Bulletin du BNM*, n° 68, avril 1987, pp. 7-12.

Bastie, J. (1987b). « Conséquence pratique du changement de définition de la candela. » *LUX*, n° 145, novembre-décembre 1987, pp. 9-15.

Bastie, J. et Andasse, B. (1991a). « Les détecteurs silicium et germanium étalons de transfert pour les mesures de rayonnement dans le domaine spectral 300 – 1600. » *Congrès international de métrologie 17-19 septembre 1991*, Lyon.

Bastie, J., Andasse, B. et Foucart, R. (1991b). « Luminous Flux Measurement with a Goniophotometer: Study on Time Effects on Data Collection. » *Proceedings of 22nd Session of the CIE* (vol. 1, part 1), Melbourne, Division 2, pp. 44-47.

Bastie, J. et Lecollinet, P. (1993). « Photodetector Linearity Measurement Over a Wide Dynamic Range. » *IMEKO XIII World Congress*, Turin.

Blevin, W. R. et Steiner, B. (1975). « Redefinition of the candela and the lumen. » *Metrologia*, tome XI, volume III, septembre 1975, pp. 97-114.

BNM (1973). « Les chaînes d'étalonnage. » *Bulletin d'information du BNM*, numéro spécial, mars 1973.

Bryden, A. J. (1970). « Le concept de chaîne d'étalonnage. » *Bulletin d'information du BNM*, n° 2, octobre 1970.

CIE (Commission internationale de l'éclairage) (1924). *Recueil des travaux et compte rendu des séances*. 6^e session, Genève, juillet 1924, p. 67.

CIE (1963). *Historique de la Commission Internationale de l'Éclairage*. Publication n° 9, p. 12 (français et allemand), p. 13 (anglais).

CIE (1985). *Electrically Calibrated Detectors of Optical Radiation (Absolute Radiometry)*. Publication n° 65, 1985.

Debure, M. et Leroy, N. (1952). « L'étalon primaire d'intensité lumineuse et l'échelle photométrique au Conservatoire National des Arts et Métiers. » *Revue d'optique théorique et instrumentale*, tome xxxi, volume XII, décembre 1952, pp. 529-543.

Debure, M. (1969). « Situation actuelle de la photométrie fondamentale au Laboratoire National d'Essais. » *Revue Générale de l'électricité*, tome LXXVIII, volume XI, novembre 1969.

Eckerle, K. L., Bastie, J., Zwinkels, J., Saprisky, V. et Ulyanov, A. (1993). « Comparison of Regular Transmittance Scales of Four National Standardizing Laboratories. » *Color Research and Application*, volume xviii, n° 1, February 1993.

Fleury, P. (1932). « Étalons photométriques. » *Encyclopédie Photométrique*, tome II, 3^e section, « Photométrie visuelle ». Paris: Éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale.

Hyde, E. P. (1907). « A Comparison of the Unit of Luminous Intensity of the United States, with those of Germany, England and France. » *Bulletin of the Bureau of Standards* (Washington), volume III, p. 65 et suiv.

Johnston, S. F. (2001). *A History of Light and Colour Measurement: Science in the Shadows*. Bristol : Institute of Physics Publishing.

Katnah, A., Coutin, J.-M., Habauzit, C. et Bastie, J. (1999a). « Nouvelle matérialisation de la candela au BNM-INM. » *9^e Congrès international de métrologie*.

Katnah, A., Coutin, J.-M. et Bastie, J. (1999b). « Realisation of the Candela Based on a Cryogenic Radiometer. » *CIE 24th Session*, Warsaw.

Lecollinet, P. et Bastie, J. (1995). « Mesure de la linéarité des détecteurs utilisés en radiométrie. » *7^e Congrès International de Métrologie*.

Lecollinet, P. et Bastie, J. (1996). « Mesure de la linéarité des détecteurs utilisés en radiométrie. » *Bulletin du BNM*, n° 106, octobre 1996, pp. 37-45.

Lecollinet, P. et Bastie, J. (1997). « Mesure des facteurs de transmission de filtres optiques au BNM-INM. » *Actes des conférences du 8^e Congrès International de Métrologie*, Besançon, 1997, pp. 143-148.

Obein, G., Gonzalez-Galvan, L. et Bastie, J. (2007). « Nouvelle réalisation de la candela au LNE-INM/Cnam. » *Revue française de métrologie*, n° 12, volume IV, pp. 19-28.

Pichon, M. (1982). « Étude et réalisation d'un gonioréfectomètre. » *Travail pratique de cycle C*, Cnam, décembre 1982.

Razet, A. et Bastie, J. (2001). « Étalonnage de surface de diaphragmes pour des mesures radiométriques. » *Actes des conférences du 10^e Congrès International de Métrologie*, Saint Louis, 2001.

Terrien, J. (1972). *La photométrie*. Paris : Presses universitaires de France.

Touayar, O., Coutin, J.-M. et Bastie, J. (1993). « Le radiomètre cryogénique : référence primaire du BNM-INM pour les mesures de rayonnement optiques. » *Bulletin du BNM*, n° 117, volume III, pp. 35-44.

Touayar, O., Rougié, B., Coutin, J.-M. et Bastie, J. (1998). « Measurement of the reflectance of the INM cryogenic radiometer cavity at several wavelengths. » *Metrologia*, 1998, 35, pp. 387-391.

Travis, J. C., Campos Acosta, J., Andor, G., Bastie, J., Blattner, P., Chunnillall, C. J., Crosson, S. C., Diewer, D. L., Early, E. A., Hengstberger, F., Kim, C. S., Liedquist, L., Manoocheri, F., Mercader, F., Monard, L. A. G., Nevas, S., Mito, A., Nilsson, M., Noël, M., Rodriguez, A. C., Ruiz, A., Schimacher, A., Smith, M. W., Valencia, G., van Tonder, N. et Zwinkels, J. (2005). « Intrinsic wavelength standards absorption bands in homium oxide solution for UV/Visible molecular absorption spectrophotometry. » *J. Phys. Chem. Ref. Data*, volume XXXIV, n° 1, pp. 41-56.

Walsh, J. W. T. (1953). *Photometry*, Londres : Constable & Company LTD, 2^e édition.

Walsh, J. W. T., (1963). *Historique de la Commission internationale de l'Éclairage*, Publication de la CIE, n° 9, 1963.

Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam, depuis 1967

Michel Lecollinet

Ingénieur honoraire – Laboratoire commun de métrologie LNE/Cnam.

Résumé

Dans cet article nous retraçons l'histoire des enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam, créée en 1967. Dans un contexte de redynamisation nationale de la métrologie, ces enseignements ont été élaborés par André Allisy, le titulaire de cette chaire, sur deux priorités : un équilibre entre cours (théorie) et travaux pratiques ; un accent sur la notion d'incertitude, essentielle pour des futurs métrologues. Nous montrons l'évolution de l'enseignement sur les trente années qui ont suivi, en insistant sur la synergie construite avec la recherche menée à l'Institut national de métrologie (Cnam) et d'autres enseignements de chaires créées au Cnam, dans les années 1980-1990 (sur des thématiques proches, comme l'instrumentation, l'optique, les capteurs).

Introduction

Cet article présente l'histoire des enseignements donnés au Cnam au sein de la Chaire de métrologie. Créée en 1967, elle a été la première chaire dédiée à cette question (en France). L'article est écrit dans une perspective documentaire et historique, car cette histoire n'a pas encore été relatée, et que la principale source d'information est la mémoire des acteurs de cette histoire. L'article s'appuie sur cette mémoire, doublée des éditions qui ont été faites des cours en question, et d'archives du Cnam donnant des informations sur les publics de ces enseignements, en particulier. L'article contextualise ces enseignements, en les replaçant à la fois dans les évolutions de l'institution elle-même¹ et dans les évolutions plus conceptuelles de la métrologie.

¹ Ces transformations de l'institution et en particulier l'implication du Cnam dans l'organisation de la Métrologie nationale sont détaillés dans les articles de C. Fontanon et L. Petitgirard dans ce même dossier.

Qu'est-ce que la métrologie ? Avant d'entrer dans la question de son enseignement, et les formes que cet enseignement a prises au Cnam, il est utile de donner quelques définitions. Dans un dictionnaire usuel, tel que Larousse ou le Robert, la métrologie désigne de manière générique la « science des mesures ». Les acteurs de la métrologie, au niveau international, sont plus précis : « La métrologie est la science de la mesure », assortie de la nécessaire « estimation de son incertitude ». Toutes les notions clés du domaine ont été rassemblées dans le Vocabulaire international de la métrologie (VIM) édité par le BIPM (Bureau international des poids et mesures)².

L'activité de métrologie recouvre plusieurs types d'interventions. Pour certains (en particulier les mécaniciens), il s'agit de la métrologie dite d'atelier, chargée de vérifier et d'attester qu'une pièce est conforme à des spécifications : on parle en termes de cotes, de tolérance. Pour d'autres, la métrologie est celle des poids utilisés dans le commerce, des volumètres de distribution des carburants et des cinémomètres radars : c'est le versant « Métrologie légale » de cette activité qui a vocation à garantir l'honnêteté des transactions entre particuliers et

professionnels, par la réglementation des mesures utilisées dans le commerce et l'industrie. Les scientifiques, ingénieurs et techniciens, dans leur laboratoire de métrologie, ont d'autres objectifs : avec des montages sophistiqués, des instruments performants, ils élaborent les systèmes de référence, créent des étalons, améliorent leur justesse, pour diffuser des normes mises à jour constamment. Ces activités de métrologie scientifique, de métrologie primaire (qui s'attache à développer des étalons primaires) ont incombé, en partie, depuis le XIX^e siècle au Cnam. La création de la Chaire de métrologie en 1967 s'inscrit dans cette perspective, avec un accent porté sur le développement de la recherche et la création d'enseignements modernes de la discipline : c'est ce qui est détaillé dans cet article.

Ce rapide survol permet également de percevoir que si la métrologie est qualifiée de science, ce n'est ni une science autonome, ni un ensemble de théories qui se déduiraient de quelques résultats expérimentaux. La métrologie se situe à la croisée de multiples domaines d'activité et puise ses racines dans de nombreuses disciplines : la physique bien entendu, plus précisément dans un champ disciplinaire de la physique puisqu'on ne traite pas de la même manière des mesures en mécanique, en électricité ou en thermique, car les lois qui établissent les liens entre les grandeurs de ces domaines ne sont pas les mêmes. Les mathématiques sont incontournables, plus particulièrement en ce qui concerne les variables aléatoires et

² Le VIM est un guide qui fait référence depuis 30 ans dans le domaine de la métrologie. Il est produit, avec le GUM (Guide pour l'expression des incertitudes de mesure) par le *Joint Committee for Guides in Metrology*. Pour plus de précision sur le contexte et l'évolution de ces guides, voir (Mari, 2015). GUM et VIM sont téléchargeables sur le site Internet du BIPM (www.bipm.org).

les techniques d'estimation, les théories sous-jacentes au traitement du signal, et à la technologie liée au fonctionnement des instruments de mesure. La métrologie puise dans les connaissances liées à ces domaines variés pour les mettre en synergie. C'est ce qui fait une spécificité et une partie de la difficulté de la métrologie, posant un défi à l'enseignement de cette discipline. Et il ne faut pas perdre de vue que deux qualités au moins sont à transmettre au métrologue averti : l'impératif de comprendre les phénomènes et la mise en question systématique de la validité des résultats de mesure obtenus.

Comme Monsieur Jourdain faisait de la prose sans le savoir, tout le monde, d'une certaine manière, fait de la métrologie. Si un passant vous demande l'heure, que faites-vous ? Vous regardez votre montre et vous lisez l'information qu'elle donne. Mais comment s'assurer qu'elle donne l'heure exacte ? Vous pouvez confronter l'indication de votre montre avec une autre montre, si possible de « meilleure qualité », ou encore écouter la radio, ou téléphoner à l'horloge parlante, ou vous connecter sur le site du BIPM *via* Internet. Il s'agit là tout simplement d'un raccordement de votre montre à une autre référence de temps dont la qualité et la fiabilité sont reconnues. L'Institut national de métrologie, établi en même temps que la Chaire de métrologie en 1967-1968, travaille précisément à établir ces références : c'est ainsi que l'enseignement de métrologie a été adossé à un laboratoire national de recherche.

Dans cette introduction, il faut également souligner l'importance des enjeux autour de la question des incertitudes en métrologie. L'incertitude est un concept essentiel pour le métrologue. Car il s'agit de déterminer la limite de la connaissance apportée par le résultat de la 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 il ne serait pas possible d'avoir confiance dans le résultat. Cette notion d'incertitude est à la fois ancienne (elle remonte en quelque sorte aux analyses d'erreurs de Carl Gauss (1777-1855)³) et récente : depuis les années 1980, le BIPM a entrepris la rédaction des GUM (Guide pour l'expres-

3 (Wise, 1995) donne un aperçu historique concernant l'émergence de la précision, son importance, en physique comme dans plusieurs domaines de l'industrie au XIX^e siècle. Gauss a proposé une vision statistique dans le processus de mesures répétées. Ce qui a introduit les notions d'« erreur aléatoire » et d'« erreur systématique » pour tenter de distinguer les sources d'erreur. Cette classification est toutefois mise en défaut dans le caractère opérationnel des mesures : la répétition d'un processus de mesure fait certes apparaître une dispersion des résultats due « aux erreurs aléatoires » mais aussi à d'autres causes non maîtrisées ou incomplètement maîtrisées. *A contrario*, une erreur systématique constante ne peut être mise en évidence de cette manière et fait appel à la connaissance et à l'esprit critique de l'opérateur ainsi qu'à l'analyse physique pour être identifiée et corrigée. L'expression de la « qualité » d'un résultat de mesure repose actuellement sur la notion d'incertitude, celle-ci étant estimée par des procédés mettant en œuvre des méthodes statistiques (méthodes de type A) ou évaluées par d'autres moyens, s'appuyant par exemple sur l'analyse physique du processus de mesure complet (méthodes de type B). Cela permet également de corriger les erreurs correspondantes. Quelle que soit la méthode utilisée, l'incertitude de mesure s'exprime par un écart-type (ou un multiple de celui-ci). Voir (Lecollinet, 1991).

sion des incertitudes de mesure) visant à harmoniser les pratiques de métrologie en matière d'incertitudes.

Reprenons l'exemple de la montre : si elle indique 18 h 38, on ne peut pas en conclure qu'il est exactement cette heure. Au mieux, on peut affirmer que l'heure est comprise entre 18 h 37 et 18 h 38 ou bien 18 h 38 et 18 h 39, tout dépendant de la manière de mettre la montre à l'heure (ceci suppose bien évidemment que tout est correct par ailleurs). Il en serait autrement si la montre indiquait également les secondes... mais, avec ou sans indication des secondes, il s'agit de deux instruments différents ! Loin de se résumer à une formule mathématique, comme le précise le GUM (version de 1992) : « *l'évaluation de l'incertitude n'est jamais une tâche de routine ni une opération purement mathématique : elle dépend de la connaissance détaillée de la nature du mesurande et du mesurage*⁴ »... sans oublier l'aspect économique, l'adéquation des moyens mis en œuvre au besoin exprimé qui induit nécessairement la notion de rapport qualité/coût. Tout ceci explique l'effort porté, au niveau international, pour préciser comment qualifier les incertitudes, pour parvenir à des mesures dont le résultat est assorti d'une incertitude, qui ne prête à aucune ambiguïté.

⁴ Dans la langue française le terme « mesure » ne distingue pas l'opération de mesure (mesurer une grandeur) du résultat de cette action (la mesure). Pour clarifier cette distinction, ont été introduits les termes « mesurage » qui correspond à l'opération de mesure, et « mesurande » qui désigne l'objet qui est mesuré.

Pour présenter cette histoire des enseignements de métrologie au Cnam, l'article est organisé en trois parties principales : la création de l'enseignement, qui souligne les liens forts entretenus entre le Cnam et la métrologie du point de vue scientifique et institutionnel ; la seconde partie montre les évolutions des cours, pris dans les transformations internes et externes au Cnam. Dans un dernier temps on donnera quelques indications sur les publics de ces enseignements.

La création de l'enseignement de métrologie au Cnam

Le contexte de la création de l'enseignement de métrologie

La métrologie a une place de longue date au Cnam mais son enseignement est tardif au regard de l'importance prise par cette activité dans le système scientifique, technique et économique. Le Système métrique, créé sous la Révolution française, a été encouragé, développé en particulier au Cnam après 1848. Ceci explique le rôle privilégié de la France et du Cnam dans la construction du système métrologique international. La France a joué un rôle moteur dans la signature de la Convention du mètre en 1875, conduisant à l'établissement du BIPM (organisme international créé par ce traité diploma-

tique, la France mettant à disposition le pavillon de Breteuil dans le parc de Saint-Cloud)⁵.

Alors qu'un certain nombre de pays ont pris conscience de l'intérêt de la métrologie pour le développement de leur commerce et de leur industrie, et ont créé les organismes en charge de ce domaine, il apparaît que la France a connu une éclipse au début du xx^e siècle. Aux États-Unis, le National Bureau of Standards (NBS)⁶ a été créé en 1901 ; en Allemagne la Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR⁷) créée en 1887 et, au Royaume-Uni, est installé le National Physical Laboratory (NPL) depuis 1900.

En France, le Laboratoire d'essais créé en 1900 (au Cnam) s'occupe de contrôle et d'essais, prioritairement. Le « Service des poids et mesures » (devenu le « Service des instruments de mesure ») s'occupe de la métrologie légale au sein du ministère en charge de l'Industrie. Ce service recrute et forme ses ingénieurs et techniciens au sein de l'« École supérieure des poids et mesures » à partir de 1929 (devenue

l'« École supérieure de métrologie » initialement implantée rue de Varenne à Paris, avant d'être intégrée à l'École des mines de Douai).

La réflexion sur les besoins en France d'un organisme en charge de la métrologie dans sa globalité se concrétise seulement dans les années 1960, par la création du BNM (Bureau national de métrologie). L'aspect légal est conservé par le Service des instruments de mesure. *A contrario* de l'esprit centralisateur de la France, le BNM est une fédération d'organismes publics incluant le Cnam, le CEA, l'Observatoire de Paris, le Laboratoire central des industries électriques (LCIE) qui mettent en commun, tout en gardant la tutelle, des laboratoires (locaux, matériels et personnels) en charge de la diffusion des unités sur le territoire français. Les laboratoires assurent la représentation de la France auprès des organismes européens (Bureau central des références) et internationaux (comités consultatifs du CIPM, BIPM). C'est dans ce contexte que l'INM (Institut national de métrologie) est créé au sein du Cnam en 1968-1969, comme laboratoire clairement orienté vers la métrologie scientifique (métrologie « amont »), dans le domaine de la mécanique, la thermique et des rayonnements optiques.

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

⁵ Au même moment, le Cnam endossait un rôle technique majeur avec la définition de la section en X du mètre et la notion de fibre neutre, avec les essais sur la métallurgie de l'alliage platine-iridium, le coulage de cet alliage (même s'il a été finalement non retenu). Pour les épisodes avant et après 1848-1875, voir (Garnier, 1990), (Bernard, 1994) et l'article de C. Fontanon et L. Petitgirard dans le présent dossier.

⁶ Il est devenu le NIST (National Institute of Standards and Technology) en 1988.

⁷ C'est aujourd'hui la Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

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 : c'est ce qui explique cette création, en même temps que la métrologie s'organise au plan national avec le BNM.

Le paysage de l'enseignement de la métrologie n'est alors pas tout à fait vierge, puisque le premier cours de métrologie a été ouvert au Cnam en 1932⁸. Le constat était déjà fait qu'en matière de métrologie, la France dépendait trop de l'Allemagne, de la Grande-Bretagne, des États-Unis, de la Suisse et du BIPM. La demande venait de l'État, arguant d'un besoin d'un cours orienté vers les applications techniques sans négliger le côté scientifique⁹ : ce devait être un cours public traitant des unités métriques, des techniques de construction et de contrôle des appareils de mesure¹⁰. Il avait pour vocation de former des techniciens pour l'industrie en deux années.

8 Voir dans ce dossier l'article bilan des relations du Cnam à la Métrologie nationale, de C. Fontanon et L. Petitgirard.

9 [Archives du Cnam, fonds CDHT [4-5]. Procès-verbal de la commission du programme du cours de métrologie – 26 juin 1932.]

10 [Archives du Cnam, fonds CDHT [4-5]. Lettre de Charles Pomaret, sous-secrétaire d'État à l'enseignement technique au directeur du Cnam – 10 février 1932.]

La charge de cours a été confiée à Pierre Fleury¹¹, 38 ans, normalien, qui avait été reçu premier au concours d'agrégation de sciences physiques en 1920, puis avait obtenu le grade de docteur en 1925. Ses publications témoignent d'une intense activité de recherche dans le domaine de l'optique¹². Fleury sera nommé professeur du Cnam en 1936 à la succession de Jules Lemoine, à la Chaire de physique générale, tout en conservant la charge de l'enseignement de métrologie. Il restera au Cnam, dans cette chaire, jusqu'à sa retraite en 1964.

Ces premiers cours de métrologie au Cnam proposent un tour d'horizon sur les mesures, les mesures géométriques, les mesures mécaniques, les mesures thermométriques, la thermodynamique, l'acoustique et de l'optique¹³. Ils sont associés à des travaux pratiques, des expériences et démonstrations d'objets du musée, des visites d'entreprises¹⁴. Les effectifs des cours varient entre 55 et 79 élèves entre 1936 et 1940 et une dizaine de certificats ont été déli-

11 Voir la notice biographique sur Pierre Fleury (Mathieu, 1994).

12 Il fait ses recherches à l'École normale supérieure, sous la direction de Henry Abraham concernant la photométrie. À la faculté de Lille (1928-1936), il entreprend des études sur l'application des récepteurs photo électroniques à divers problèmes de photométrie et de spectrophotométrie.

13 [Archives du Cnam, fonds CDHT [4-5]. Cours de métrologie : les mesures dans l'industrie et le commerce (programme) – 1932.]

14 Avec ses élèves, il visite les ateliers de métrologie des Établissements Citroën, les laboratoires des poids et mesures du ministère du Commerce (1935).

vrés en 1937 et 1938. Fleury a publié chez Hermann ses *Leçons de métrologie* de 1935 à 1938 et participé aux *Journées internationales de métrologie* en juin 1938 à Paris¹⁵.

Le cours subsiste jusqu'en 1964 à raison de 20 leçons par an. 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 1960¹⁶. Il est raisonnable de faire l'hypothèse que ce cours ne constituait pas l'activité principale de Pierre Fleury, occupé par ses fonctions de directeur de l'Institut d'optique et certainement moins directement concerné par les questions métrologiques. La relative inadéquation des cours par rapport aux besoins techniques et industriels n'est pas étrangère à cette situation.

Le véritable tournant est pris dans les années 1960 avec la création de la Chaire de métrologie en 1967 seulement. André Allisy est recruté comme professeur pour cette chaire et il a mis immédiatement en place un enseignement « moderne » de la métrologie (les notes de cours ont été rassemblées dans les volumes (Allisy, 1971, 1972, 1973); pour des compléments, voir l'entretien avec André Allisy dans ce dossier). D'emblée, il a regroupé

et mis 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.

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 de manière à assurer l'utilisateur final que l'indication fournie est traçable. Les méthodes de mesure et les modes opératoires qui décrivent le processus de mesure de manière complète, étaient abordés en analogie à un processus de fabrication y compris les grandeurs d'influence.

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 de leçons d'une heure, environ la moitié était consacrée à cette thématique. 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. L'élève utilise

¹⁵ [Archives du Cnam, Fonds Thiercelin, n° 68.] Plusieurs ouvrages sont tirés de ces cours: (Fleury, 1935; 1938; 1942).

¹⁶ [Archives du Cnam. Procès-verbaux des conseils de perfectionnement – 1945-1964. Statistiques de l'enseignement (Cours de métrologie).]

des montages et des instruments, non pas des simulations informatiques qui ne permettent pas de rendre compte de tous les paramètres et sensibilités expérimentales lorsqu'on atteint les limites des instruments.

Créé initialement pendant l'année universitaire 1967-1968 sous forme d'un cours unique associé à ses TP, il conserve cette forme l'année suivante. Dans la dynamique des réformes qui ont suivi mai 1968, le Cnam restructure ses enseignements avec deux objectifs : d'une part dépoussiérer la formation d'ingénieurs qui reposait sur une liste de certificats généraux (cours et TP principaux et connexes) et un examen général de fin d'étude dont la durée pouvait atteindre huit heures, sans oublier le mémoire d'ingénieur. D'autre part, cette formation est conçue de fait avec comme point de départ le baccalauréat et ne tient pas compte du flux de plus en plus important d'auditeurs entamant les études au Cnam avec un DUT ou un BTS, et qui pouvaient être légitimement dispensés de certains enseignements. À partir de l'année scolaire 1969-1970, le cursus est composé d'unités de valeur capitalisables (1 UV correspond à un enseignement d'une année complète, cours ou TP, 1/2 valeur correspondant à la moitié). Il faut rappeler également que des séances d'exercices dirigés en accompagnement des cours ont été créées systématiquement dans les filières, les Enseignements Dirigés n'existant précédemment que de manière ponctuelle, en mathématiques par exemple.

L'ensemble des études, conçu sous forme d'un organigramme, était divisé en 3 cycles A, B et C. 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 cycle B correspondait au parcours de bac+2 à bac+4, permettant l'obtention du Diplôme d'études supérieures techniques (DEST). Le cycle C complétait la formation d'ingénieur au moyen d'un ensemble cours/TP spécialisé, un examen probatoire consistant en un exposé oral d'une recherche bibliographique sur un sujet donné et la soutenance du mémoire d'ingénieur. Dans cette nouvelle structure, les titulaires d'un DUT ou d'un BTS bénéficiaient de dispenses d'un nombre plus ou moins important de valeurs en fonction de la proximité de la spécialité du diplôme avec la spécialité visée dans les études au Cnam. L'enseignement de la métrologie a évolué pour se mettre en phase avec cette réforme, par la création de cours (associés à des séances d'exercices dirigés et de TP) pour les trois cycles A, B et C.

Le cycle A comme introduction à la métrologie

Dans l'esprit du responsable de l'enseignement, le professeur Allisy, l'enseignement de métrologie au Cnam, surtout au cycle A, avait pour vocation, non seulement la formation des métro-

logues, mais aussi d'être inclus comme discipline connexe dans l'ensemble des formations techniques du Cnam. Cette volonté d'offrir un outil polyvalent adaptable, si elle a été entendue et comprise par certains, n'a pas toujours fait l'unanimité.

À titre indicatif, les cours dans le cycle A correspondaient à 1/2 valeur de cours (et ED associés) et 1/2 valeur de TP. Étant destinés à être une introduction aux fondements de la métrologie, pour un public large, la 1/2 valeur de cours abordait plusieurs thématiques adéquates :

- 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, éléments essentiels des instruments de mesure.
- 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.

En complément de ces cours, l'enseignement expérimental TP (1/2 valeur), abordait les points suivants :

- 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. En distinguant les capteurs actifs (piézo-électricité appliquée aux mesures d'accélération, couples thermoélectriques appliqués aux mesures de température) et les capteurs passifs (capteur de déplacement à jauges résistives, intérêt des ponts de mesures pour la sensibilité de détection et sur la maîtrise de l'influence de la température).
- Étude d'une balance, caractéristiques, grandeurs d'influence, double pesée, correction de poussée de l'air.
- Le signal de mesure : aspect temporel (oscilloscope), aspect fréquentiel (analyse et synthèse d'un signal périodique), mise en évidence des artefacts d'un analyseur FFT¹⁷.

Le cycle B, comme approfondissement

Le cycle B constitue un approfondissement par rapport au cycle A, avec un public d'auditeurs plus intéressés par les questions métrologiques *a priori*. Un élève suivait une valeur de cours (et ED associés)

¹⁷ *Fast Fourier Transform*, en français : Transformée de Fourier Rapide. C'est un algorithme de traitement du signal, permettant de transformer des données du domaine temporel au domaine fréquentiel (spectre).

et une valeur de TP. Le cours était articulé par 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 : causes susceptibles d'être corrigées après analyse et maîtrise des causes correspondantes, causes non maîtrisées se traduisant par une dispersion des résultats de mesures répétées.
- 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, qui aboutira à la première version du GUM dans les années 1990.

Dans l'enseignement expérimental TP (1 valeur), l'accent est porté principalement 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 :

- Mesure absolue de champ d'induction magnétique par résonance magnétique nucléaire, suivie de l'étalonnage par comparaison de sondes à effet Hall.
- Utilisation d'un pont de comparaisons de capacités en association avec l'étude et l'utilisation d'un condensateur calculable de Lampard pour l'étalonnage absolu de capacités de faibles valeurs (0,25 pF). Comparaison et mesure de capacités pour aboutir à des capacités de 5000 pF, et enfin comparaison de l'impédance de ces dernières, à une fréquence connue, à des résistances de 20 k Ω .
- Notion de quadripôle réciproque ; application à l'étalonnage absolu de microphones et d'accéléromètres utilisant la méthode de réciprocité.
- Étalonnage de capteur de pressions, avec comme référence un manomètre à colonne de mercure ou une balance à piston tournant.
- Utilisation de la méthode des moindres carrés pour l'étalonnage par comparaison de masses en série fermée, puis raccordement de l'ensemble à une masse de référence, de matériau différent ; maîtrise de la correction de poussée de l'air.
- Détermination de masse volumique de solides en utilisant la masse volumique de l'eau comme référence.

- Étalonnage de thermomètres en utilisant des points fixes de l'EITP 68 puis de l'EIT 90¹⁸ et les mécanismes d'interpolation entre ces points.
- Étalonnage de thermomètres par comparaison, mesure de la température d'un four.
- Mesure des hautes températures par pyrométrie optique.
- Étalonnage en amplitude et caractérisation d'un récepteur photo électrique en fonction de la longueur d'onde.

Au cours des travaux pratiques, la philosophie pédagogique est de suivre le cheminement des laboratoires de métrologie, dans son principe et de manière la plus proche de la réalité du laboratoire. Et dans cette perspective il faut rappeler que l'INM est le 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 conçus et mis en œuvre dans la Chaire.

¹⁸ La définition purement conceptuelle de l'unité de température thermodynamique ne permet pas de faire des mesures. Dans la pratique, les températures sont mesurées (ou plus exactement repérées) dans une échelle composée de points fixes (à chaque point de fusion ou de congélation est assignée une valeur conventionnelle de température, aussi voisine que possible de la température thermodynamique correspondante), d'instruments (thermomètres) et de polynômes d'interpolation entre ces points fixes. Ces échelles sont révisées pour tenir compte des progrès réalisés dans le domaine. Il est fait ici allusion respectivement à l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EITP 68) et à l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT 90).

Par exemple, concernant la mesure des résistances électriques, il s'agit de procéder comme au Laboratoire de métrologie électrique pour relier de manière absolue les étalons de résistance à une référence calculable à partir de la mesure d'un déplacement. Les impératifs de temps (séances de manipulation de 4 heures) obligeaient toutefois à des simplifications du mode opératoire : ainsi les mesures se font dans l'air et non sous vide, et les mesures de déplacements se font par des moyens mécaniques et non par interférométrie. De même il manque la dernière partie de la manipulation réelle consistant dans le transfert de la valeur de la résistance mesurée en alternatif, à la valeur de la même résistance en régime continu.

Cette manipulation répond à plusieurs objectifs : utiliser la technique des ponts en électricité que ce soient les ponts de comparaison de capacité ou les ponts dits de quadrature pour la comparaison des capacités et des résistances¹⁹. Il s'agit de faire prendre conscience de la difficulté d'obtenir des équilibres stables et insensibles aux variations de l'environnement en alternatif.

Toujours dans ce cadre du cycle B, deux dominantes étaient proposées aux élèves : « Instrumentation » et « Optique appliquées aux mesurages ». Dans la do-

¹⁹ La technologie des capacités à trois bornes, qui permet de mesurer de manière exacte des capacités de 0,25 pF en éliminant l'influence de la capacité des cordons de liaison de l'ordre de 100 pF par mètre de longueur (sans compter la connectique nécessaire), est mise en œuvre.

minante « 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.

De manière générale, il faut noter que les auditeurs des TP avaient à disposition des systèmes de calcul programmables leur permettant, aussi bien au cycle A qu'au cycle B, soit d'utiliser des programmes existants (moyenne, écarts-types, droite des moindres carrés), soit de développer leur propre programme : l'initiation aux langages de calcul pertinents étant partie intégrante des TP. Dès 1968, une calculatrice programmable Olivetti P101 était à la disposition des élèves, suivie quelques années plus tard d'un ordinateur HP programmable en langage Basic. L'évolution des systèmes informatiques autonomes a ensuite permis le pilotage de certaines manipulations à l'aide de micro-ordinateurs, libérant les auditeurs de tâches répétitives fastidieuses, leur permettant de centrer leurs efforts sur l'essentiel.

Soulignons également l'importance des TP, considérés comme une valeur sinon difficile, au moins très exigeante au point de vue du temps à y consacrer : les auditeurs préféraient souvent la réserver pour la fin de leur cursus. Comme dans beaucoup de matières enseignées au Cnam, les TP étaient souvent considérés comme très structurants pour la formation, profitables également dans la mesure où ils assuraient une fonction plus sociale de connaissance mutuelle des élèves.

Entre la Chaire et l'INM, la spécialisation dans le cycle C

Le cycle C était destiné aux auditeurs envisageant une spécialisation en métrologie. Il était constitué d'une valeur mixte cours/TP, de l'examen probatoire, du travail et de la soutenance du mémoire d'ingénieur. C'est dans ce cadre que la synergie avec le laboratoire INM est la plus évidente. Pour une illustration claire et précise dans le domaine de la photométrie, nous renvoyons à l'article de Jean Bastie dans le présent dossier.

Au point de vue théorique (1/2 valeur théorique Métrologie C), 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 syn-

chrone). Ces enseignements étaient sous la responsabilité de Patrick Bouchareine, enseignant-chercheur à l'INM dans le domaine de l'interférométrie.

Concernant la 1/2 valeur expérimentale, les auditeurs sont seuls ou en binômes, et projetés dans une situation « réaliste », similaire à leur futur environnement professionnel. Ils doivent, à partir d'un sujet donné, définir le besoin, faire le bilan du matériel nécessaire (les instruments classiques d'un laboratoire sont mis à leur disposition), faire réaliser éventuellement ce qui est spécifique, réaliser les montages nécessaires, faire les mesures et les exploiter, analyser le résultat obtenu et faire le bilan des incertitudes afin de répondre au problème posé. Les dispositifs expérimentaux réalisés étaient ensuite soit utilisés par l'INM soit injectés dans les TP de cycle A ou B afin d'en assurer la jouvence.

Citons trois exemples, parmi d'autres :

- Étude et réalisation d'un calculateur analogique basé sur les amplificateurs opérationnels, avec pour objectif de montrer les fonctions élémentaires formant un système d'asservissement de position PID (Proportionnel – Intégral – Dérivée) et l'importance de chaque fonction sur la justesse du positionnement, sa rapidité, la présence d'oscillations autour de la position d'équilibre et leur amortissement.
- Construction et caractérisation d'un four destiné à l'étalonnage de thermomètres.

- Cartographie d'un champ d'induction magnétique au moyen d'une sonde à effet Hall associée à une table de déplacement XY.

Ce travail expérimental peut être considéré comme une initiation à la recherche, amenant les auditeurs à faire une étude bibliographique sur la thématique proposée, 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. Ils sont encadrés soit par un enseignant-chercheur de la spécialité, soit par une personne travaillant à l'INM, matérialisant là encore de manière concrète le lien enseignement-recherche. Dans tous les cas, le but recherché est bien de donner toujours plus d'autonomie aux élèves confrontés à des problèmes qu'ils pourront rencontrer dans leur vie professionnelle.

L'évolution des enseignements de métrologie

Si le cycle A est resté sans changement, le cycle B a subi une évolution notable, dans les années 1980-1990, avec la création 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, nourri 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.

Dans les faits, les questions étaient présentes peu ou prou dans l'enseignement de la métrologie, la nouvelle organisation dégageait du temps pour les enseignements plus fondamentaux de cette discipline. 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 »).

Le DEST et le Diplôme d'ingénieur en « Physique – Instrumentation »

La partie traitant du signal de mesure disparaissant, les enseignements en 1/2 valeur ont été réarrangés en :

- Métrologie B1 : systèmes d'unités, matérialisation des unités, incertitudes de mesure et modélisation.
- Métrologie B2 : Spécialisation en mesures dans les domaines de l'optique, de l'électricité et de la thermo-

métrie (les thématiques disciplinaires tournant en fonction des années scolaires).

- Instrumentation B1 : acquisition du signal.
- Instrumentation B2 : traitement du signal.

Les programmes des enseignements pratiques étant déjà très diversifiés auparavant, ils ont conservé leur volume et leur contenu.

Le DEST et le Diplôme d'ingénieur en « Instrumentation – Mesure »

Suite à la création de la Chaire de physique des capteurs (professeur François Lepoutre) et à une nouvelle réforme de l'enseignement visant à raccourcir la durée des études, donc du volume horaire consacré aux enseignements et à se mettre en conformité avec les niveaux européens LMD, une nouvelle appellation du DEST apparaît avec la disparition du mot « Physique » et un retour de la « Mesure ». L'enseignement de physique des capteurs, orienté vers l'application des phénomènes physiques à la conception des capteurs (notamment la piézo-électricité) et non pas un catalogue de capteurs par domaine d'utilisation était, bien entendu, partie intégrante de l'offre de formation.

Les enseignements pratiques sont alors réduits en volume (au cycle B) ou intégrés au cours sous forme de valeur mixte (au cycle A). Les enseignements

théoriques sont eux-mêmes recoupés en $\frac{1}{4}$ de valeur. Il n'y a d'ailleurs progressivement plus de valeur (ou de sous-multiple des valeurs) mais des crédits ECTS, l'accumulation des crédits conduisant à des diplômes niveau bac + 3, bac + 5, voire bac + 8 (DEA puis Master en partenariat avec l'université Paris XIII).

De nouvelles orientations sont alors proposées : par exemple la valeur de « Métrologie – Qualité » correspondant au besoin des auditeurs du Cnam de se former aux référentiels relatifs à l'accréditation des laboratoires, non seulement de métrologie, mais aussi d'essais ou d'analyses chimiques. La spécialité STAM (Science et technique de l'analyse et de la mesure) voit le jour et tente de coordonner l'ensemble relatif à la mesure, au sens large du terme. Elle accueille les enseignements de métrologie, d'instrumentation, de physique des capteurs, en plus des enseignements gérés par la Chaire de mesures physiques et d'analyse.

Les enseignements hors du centre Cnam de Paris

Du fait de l'expertise rassemblée à l'INM et à la Chaire de métrologie, les formations dans le domaine de la métrologie ont pris de multiples formes et débouchés. Dans le cadre des missions assurées par le Cnam sur le territoire national, tout d'abord, la Chaire a fourni le soutien aux enseignements déployés dans les centres régionaux asso-

ciés (aujourd'hui appelés CCR – Centre du Cnam en région). Depuis la Chaire de Paris sont organisés la diffusion des documents de cours, l'aide aux TP de manière générale, grâce au soutien logistique local des IUT de mesure-physique impliqués. Certains auditeurs éprouvant des difficultés à trouver un enseignement proche de chez eux ont été accompagnés par un rattachement et une inscription au centre de Paris, et pour des centres du Cnam proches de Paris, l'accueil des élèves a pu être organisé dans les travaux pratiques parisiens. En dehors de l'enseignement HTO « Hors Temps Ouvert », les enseignements de métrologie sont proposés et diffusés au sein du Cnam sur les modalités de l'apprentissage : c'est le cadre « Ingénieur 2000 » intégrant la métrologie dans les spécialités électronique-informatique et mécanique. Le centre de formation délègue l'enseignement sur les capteurs à la Chaire de métrologie.

Hors du Cnam, les enseignants ont participé régulièrement à de nombreuses formations spécialisées en métrologie dans des établissements variés : ESM – École 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.

Quel public pour les enseignements de la Chaire ?

Comme tous les publics auditeurs du Cnam, il est difficile de catégoriser les élèves des enseignements en question, ce public étant souvent hétérogène. Reste que le public est très majoritairement composé de titulaire d'un DUT (bac + 2), essentiellement en mesure physique, également en contrôle industriel, régulation, automatisme, et plus rarement d'un BTS de physicien. Ils travaillent souvent dans des grandes entreprises (CEA, EDF, constructeurs automobiles, Thomson...) où ils peuvent espérer trouver un sujet pour leur mémoire d'ingénieur.

Le nombre de présents aux cours est consultable sur les registres du Cnam qui reportent pour chaque cours le sujet de la leçon et le nombre d'auditeurs présents. La première année d'ouverture des cours, l'enseignement a été suivi par 58 auditeurs en moyenne. Pour les premières années d'existence de la Chaire de métrologie, on peut noter les chiffres suivants :

Dans le cycle A

1969-1970	87 auditeurs
1970-1971	75 auditeurs
1971-1972	63 auditeurs
1972-1973	52 auditeurs

Dans le cycle B

1969-1970	60 auditeurs
1970-1971	38 auditeurs
1971-1972	47 auditeurs
1972-1973	43 auditeurs

Le cycle a été relativement bien suivi d'année en année, mais le nombre de présents s'étioloie manifestement. *A contrario*, la création de la Chaire d'instrumentation a provoqué un afflux d'auditeurs aussi bien en instrumentation qu'en métrologie, avec un pic à plus de 100 auditeurs au cours magistral avec pour conséquence le triplement des séances d'enseignement dirigé au cycle B. Cela s'inscrit dans un contexte d'évolution de la métrologie et de nouveaux besoins de compétences. Les enseignements, dans les années 1980-1990, ont été mis en adéquation avec ces nouveaux besoins.

Il faut ajouter que les processus d'accréditation des laboratoires et la mise sous assurance qualité des entreprises, ont impliqué la nécessité de maîtriser la notion de traçabilité, quelque que soit le référentiel utilisé. On a pu noter ensuite une décroissance progressive des inscriptions (cette remarque étant une tendance beaucoup plus générale concernant les enseignements scientifiques et techniques) plus marquée au cycle A (en conséquence du recrutement majoritaire à bac + 2).

Les causes en sont multiples : besoins en formation couverts par d'autres organismes ; diversification des formations. Par exemple le DUT « Mesures physiques » inclut dans son programme une formation à la métrologie. Les besoins des industriels quant à eux sont généralement ciblés et ponctuels, et la réponse se trouve dans l'offre de la formation continue, également assurée par les enseignants-chercheurs de la Chaire et de l'INM (le décompte et le panorama de ces formations sortent largement du cadre de cet article).

Conclusion

Dans un contexte de mise à niveau de la Métrologie nationale à la fin des années 1960, la Chaire de métrologie a été créée, en parallèle de l'INM, pour assurer une fonction de formation et de dissémination des conceptions modernes en métrologie. Sur cette hypothèse, le développement de ces activités doit beaucoup au titulaire de la Chaire, André Allisy : à la fois physicien au BIPM, 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 moment²⁰. Dans ce contexte, il faut également rappeler que le BNM est créé pour coordonner les efforts en métrologie (métrologie pri-

maire et dissémination) : or cela nécessitait de former rapidement des personnels compétents pour les différents laboratoires. Le Cnam était en position particulièrement favorable pour réaliser ce pari du rattrapage en métrologie, et possédait en outre un quasi-monopole sur la diffusion de la notion « moderne » d'incertitude de mesure. La notion est restée une pierre de touche de l'enseignement de métrologie, suivant les évolutions de la recommandation INC-1 (1980) puis l'apparition du GUM à partir de 1992²¹.

Ce contexte n'a duré qu'un temps, et tout cet article a montré les évolutions successives des contenus des enseignements, en suivant les besoins tant scientifiques, techniques qu'industriels. Ces évolutions reposent sur deux constantes liées à l'institution : un appui scientifique

²¹ 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. Cette analyse a révélé l'accord général des métrologues sur la manière d'aborder ce qu'il était convenu d'appeler à cette époque les « erreurs à caractère aléatoire ». En revanche, l'approche des « erreurs à caractère systématique » était loin d'être consensuelle. Considérant qu'une approche unifiée des laboratoires de métrologie sur ce point était nécessaire, le groupe de travail a formulé la recommandation INC-1, adoptée par le CIPM en 1981. Ainsi ont été introduits les concepts nouveaux d'incertitude pour estimer l'effet des causes d'erreurs aléatoires ou systématiques sur le résultat de mesure, cette estimation pouvant résulter d'une approche statistique, ou d'autres approches, selon ce qui est le plus pertinent dans un contexte donné. Quelle que soit la méthode utilisée, l'incertitude s'exprime sous forme d'un écart-type, la loi de composition des variances devient ainsi une loi de composition « universelle des incertitudes », mettant un terme à la distinction aléatoire/systématique.

²⁰ Pour plus de détails concernant son parcours et projets, voir l'entretien avec André Allisy dans ce dossier.

du côté de l'INM (et de ses personnels très spécialisés) et une synergie créée avec d'autres spécialités au Cnam, à partir des années 1980 et 1990 surtout.

De par la nature hybride et réticulaire de la métrologie, il était à la fois nécessaire et possible de fédérer des enseignements connexes (instrumentation, capteurs) indispensables au processus de mesure et d'offrir ainsi une formation qui permet à l'auditeur de s'approprier les notions fondamentales pour ensuite les restituer et les développer dans son contexte de travail. Il en est de même de l'extension de la formation vers les problématiques de l'accréditation des laboratoires de métrologie et d'essais, et du management de la métrologie imposés par l'application des référentiels normatifs.

L'INM étant un laboratoire de métrologie scientifique, élaborant les références métrologiques primaires, les enseignements sont bien évidemment restés cadrés par ce contexte. Le projet initial, comme ses évolutions, est à l'image de la perception de la métrologie selon André Allisy, lequel a toujours pensé que la métrologie peut se définir comme un vaste réseau qui innerve les activités de la vie courante, du commerce, de l'industrie et de la science. Néanmoins, les formations à la métrologie, dans toutes ses dimensions techniques et industrielles, ont pu se développer par ailleurs et sous d'autres formes, car le contexte du Cnam et de l'INM restreignait d'emblée son périmètre d'intervention.

Bibliographie

- Allisy, A. (1971). « L'Enseignement de la métrologie au Conservatoire national des arts et métiers. » *Bulletin du Bureau national de métrologie*, Volume III.
- Allisy, A. (1972). *Cours de métrologie*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Allisy, A. (1973). *Notes de métrologie C-1973 : traitement de données expérimentales*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Allisy, A. (1980). *Les erreurs aléatoires*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Allisy, A. (1983). *Les incertitudes de mesures*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Bernard, M.-Y. (1994). *Le Conservatoire national des arts et métiers : vers le XXI^e siècle*, Paris : Eyrolles.
- Fleury, P. (1935). *Généralités sur les mesures*, Paris : Hermann, 1935.
- Fleury, P. (1938). *Leçons de métrologie générale et appliquée*, Paris : Hermann, 1938.
- Fleury, P. (1942). *Résumés des leçons de métrologie générale et industrielle. 5^e partie : Mesures thermiques*, Paris : Cnam, 1942.
- Garnier, B. et Hocquet, J.-C. (éds.) (1990). *Genèse et diffusion du système métrique*. Caen : Diffusion du Lys.
- Lecollinet, M. (1985). *Exercices dirigés de métrologie instrumentation B1 : métrologie B3*, Paris : Cnam.
- Lecollinet, M. (1989). *Métrologie instrumentation : exercices dirigés B1*, Paris : Cnam.
- Lecollinet, M. (1991). *Traitement des données expérimentales : incertitudes de mesure, tests statistiques, ajustement des données*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Mari, L. (2015). « Evolution of 30 Years of the International Vocabulary of Metrology (VIM). » *Metrologia* 52 (1), pp. R1-R10.
- Mathieu, J.-P. (1994). « Pierre Fleury (1894-1976). Professeur de métrologie ; Professeur de physique générale dans ses rapports à l'industrie (1936-1964). » In Fontanon, C. et Grelon, A. (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955*. Paris : INRP/Cnam (Collection Histoire biographique de l'enseignement, 2 volumes), pp. 510-515.
- Morillon, C. (1987a). *Instrumentation scientifique B1 : cours 1^{er} fascicule*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Morillon, C. (1987b). *Instrumentation scientifique : cours B2*, Paris : Conservatoire national des arts et métiers.
- Wise, M. N. (1995). *The Values of Precision*. Princeton (N.J.) : Princeton University Press.

Entretien avec André Allisy

Réalisé le 12 décembre 2012

par Claudine Fontanon (*EHESS, CAK et HT2S*) et Loïc Petitgirard (*Cnam, HT2S*).

André Allisy entre officiellement au Cnam comme professeur titulaire de la Chaire de métrologie, le 1^{er} novembre 1967. Dans l'entretien qui suit, centré sur la période 1950-1970, il livre un aperçu de sa carrière avant son arrivée au Cnam, et sur ses débuts comme professeur du Cnam.

À l'image de beaucoup de professeurs du Cnam, André Allisy a eu un pied dans le monde académique, un pied dans l'industrie. Immédiatement après sa formation, il a travaillé comme physicien, dans le giron d'Yves Rocard, alors « patron » de la physique à l'ENS à Paris¹. Au sein du Service des études et recherches de la Direction centrale des constructions et armes navales, il travaille dans 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).

Au laboratoire de l'ENS, il contribue au développement de la dosimétrie, élabore un nouvel étalon français pour l'unité Roentgen. Il fait ses armes simultanément dans la société Massiot (qui deviendra Massiot-Philips en 1960, en tant que filiale du groupe néerlandais Philips; aujourd'hui devenue Philips Systèmes médicaux) et dépose plusieurs brevets en France et aux États-Unis.

L'entretien revient sur les circonstances qui le conduisent à prendre des responsabilités dans le domaine de la métrologie, au plan national et international. Il entre dans les comités internationaux, en particulier l'ICRU (International Commission on Radiation Units – la commission internationale des unités de mesure de rayonnement), et il va organiser la recherche sur ces questions au BIPM (Bureau international des

¹ Pour plus de détails sur ce contexte, nous renvoyons à Dominique Pestre, « La création d'un nouvel univers physicien, Yves Rocard et le laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure, 1938-1960 », *Le Livre du Bicentenaire de l'École Normale Supérieure*, sous la direction de J.-F. Sirinelli, Paris: PUF, 1994, pp. 405-422.

poids et mesures), à Sèvres: en 1961 il est nommé chercheur principal, physicien, chargé de la section des rayonnements ionisants. Il porte la construction d'une équipe et d'un laboratoire dédié au sein du BIPM, expérience dont on peut imaginer qu'elle a été formatrice pour ses projets au Cnam.

Son arrivée au Cnam est synonyme du développement d'un double projet d'enseignement et de recherche. Tout d'abord, il souhaite 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 suivis et demandés). Le projet de recherche correspond à la mise sur pied de l'INM (Institut national de métrologie). L'entretien éclaire ces débuts, les choix, les difficultés et obstacles, les réussites. Les mots d'André Allisy révèlent le passionné, le passeur, le médiateur qui a permis de diffuser une certaine culture de la métrologie en France, en écho aux transformations au plan international.

André Allisy prend sa retraite du Cnam en 1990: il restera dans les comités internationaux de dosimétrie, comme expert, jusqu'en 1997. Cette double activité est un trait significatif de sa carrière: son domaine de prédilection est celui des rayonnements ionisants, mais ce n'est pas une activité développée au Cnam, dans les recherches conduites au sein de l'INM. Car l'INM portait, et porte encore, la métrologie scientifique

française pour quatre unités fondamentales: longueur (mètre), masse (kg), intensité lumineuse (candela) et température thermodynamique (kelvin).

Le parcours d'André Allisy est d'autant plus important pour l'histoire du Cnam qu'il croise avec une transformation majeure de l'établissement: 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. Sur ce point nous renvoyons au texte de Loïc Petitgirard dans ce dossier, qui explicite la complexité de ces relations et les tensions qui traversent l'histoire du Cnam et du LNE.

Pouvez-vous retracer en quelques mots vos « débuts » en physique, votre formation ? Vous souvenez-vous d'un professeur en particulier, quelqu'un qui vous a marqué ?

André Allisy: Tout d'abord, je suis né à Brunstatt, en Alsace, en 1924. Je suis resté en Alsace jusqu'à l'occupation allemande, en 1940-41, et puis, pour des raisons d'incompatibilité d'humeur, je suis parti à Besançon. Là, j'ai passé le baccalauréat en 1942, puisque nos dossiers de Strasbourg avaient été transmis à Besançon. Après un an de Faculté des sciences à Besançon, je suis parti à Paris. Entre Paris et Besançon il y avait une différence de zone, c'était un peu plus facile. Et je suis venu à Paris parce que j'y avais une sœur. J'ai suivi et obtenu ma licence ès sciences physiques, en 1945.

Le professeur m'ayant le plus marqué, et définitivement, c'est sans hésitation Yves Rocard. D'ailleurs, dès 1945, je suis entré dans le groupe de recherche du professeur Rocard, au laboratoire de physique de l'École normale supérieure.

Ingénieur au sein de ce laboratoire, vous avez conçu l'étalon de l'unité Roentgen, qui sera raccordé au niveau international. Comment cela s'est-il passé et comment avez-vous été sollicité ?

Au début, j'étais ingénieur contractuel à la Marine, puisque Rocard était aussi patron d'un groupe de recherche

de la Marine. J'ai travaillé sur des problèmes de téléguidage dans les ondes centimétriques. Par la suite, M. Rocard m'a orienté vers un autre groupe de son laboratoire, dans lequel travaillait un Allemand, qui devait développer un bêtatron pour la société Massiot (une société de radiologie). Aux yeux de Rocard, cette recherche n'avancait pas. Il m'a demandé d'en faire une évaluation, et je lui ai dit rapidement qu'il n'était pas la peine de continuer.

M. Massiot s'est retourné vers M. Rocard pour déterminer ce qu'il pouvait faire. Massiot fabriquait depuis des années, sous licence avec les Autrichiens, un dosimètre pour mesurer les rayons X. Rocard lui a indiqué qu'avec le laboratoire de recherche, on pourrait peut-être chercher à comprendre le fonctionnement de ces dosimètres. C'est ainsi que je me suis lancé dans une activité sur la dosimétrie dans le laboratoire. J'ai tout de suite vu qu'il n'y avait pas d'étalon correct en France, j'ai donc commencé à construire un étalon. Et nous sommes parvenus à développer des dosimètres.

Mon étalon a été comparé à l'étalon américain du NBS². Il existe tout un article publié par le NBS sur la comparaison de l'étalon de l'ENS avec l'étalon américain. Ce qui est évidemment curieux : l'étalon était celui de la société Massiot et il était rattaché au NBS.

² *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 aux États-Unis.

En parallèle de ces travaux, un des patrons de la radiologie française s'était rendu au congrès de radiologie à Londres en 1950 et il avait assisté à l'ICRU. Cette commission rassemblait 12 personnes, qui analysaient les concepts et grandeurs physiques à mesurer, qui étudiaient les techniques et les unités de mesure. Or, ce responsable n'a pas compris un mot lors de cette commission car ce n'était pas son domaine. Il a demandé à M. Massiot s'il était possible d'envoyer un technicien, un connaisseur du domaine, au congrès de 1953 à Copenhague. M. Massiot a répondu positivement, et m'a fait envoyer à cette commission.

Je me suis retrouvé dans une situation excessivement intéressante. Cette commission ICRU était présidée par des grands noms de la physique médicale, et son secrétaire était le chef du service de métrologie du NBS à Washington. Quand j'ai démarré dans le domaine, je ne connaissais rien du tout, évidemment. En fouillant la littérature je suis tombé, dans la bibliothèque de l'École normale, sur toute la publication du NBS. Dans ces publications j'ai appris tout ce qui était nécessaire pour réaliser l'étalon. L'auteur en était Lauriston Taylor, le responsable de toute la radiométrie au NBS. Je connaissais toutes ses publications. J'étais parfaitement inconnu, parmi des grands noms de l'ICRU, et puis j'ai rencontré Lauriston Taylor, secrétaire. Je lui ai dit que je connaissais bien ses publications, et immédiatement le courant est passé. Après cette rencontre je ne suis plus passé pour un inconnu, j'étais vu comme un averti dans le domaine.

Je suis entré à l'ICRU en 1953 et j'étais toujours à l'ICRU en 1997. J'ai été nommé président d'un groupe de travail, et ensuite vice-président de l'ICRU, et ensuite président. L'ICRU a beaucoup travaillé, toujours sur l'impulsion de Taylor, pour que le BIPM s'occupe aussi des rayonnements ionisants. Lauriston Taylor a fait des demandes, parce qu'il connaissait le BIPM directement pour les étalons de longueur, masse, etc. Cela a abouti à la création d'une section des rayonnements ionisants au BIPM, création d'une grande importance, parce qu'elle a doublé le budget du BIPM. Tout cela a été décidé en 1957, mais le temps de tout mettre en œuvre, l'action a vraiment débuté en 1960. Il a fallu demander une extension dans le parc de Saint-Cloud, qui a été une affaire assez longue. On m'a ensuite demandé de prendre la direction de cette section au BIPM, pour la développer. Ce que j'ai fait.

Le BIPM fonctionne de la manière suivante : il a des comités consultatifs et une des premières choses qui a été réalisée, avant même qu'il y ait des laboratoires, a été de créer un comité consultatif des étalons de rayonnement ionisant. J'ai été nommé dans ce comité, pour représenter l'ICRU. J'ai fait les deux premiers rapports, des deux premières sessions de ce comité consultatif. J'ai suivi toute cette affaire, sans être directement impliqué dans les réalisations sur site. Mais quand il a fallu vraiment démarrer une équipe, on m'a demandé de prendre la direction du projet. Je suis donc rentré au BIPM, rétribué par le BIPM, mais mon

laboratoire était toujours rue Lhomond à l'ENS, avec à peu près 7 personnes.

Au cours de cette période, vous avez enseigné : quelle était votre motivation ? Dans quel cadre et pour quel public cela s'est-il déroulé ? Comment commencez-vous à enseigner la métrologie ?

Des enseignements, j'en ai fait toute ma vie... J'ai été pendant une vingtaine d'années à l'ESME, École spéciale de mécanique et d'électricité. Comme il n'y avait pas de préparation officielle pour l'entrée à l'École supérieure d'électricité, Joachim Sudria a pris l'initiative de créer une école privée de préparation. Puis il a étendu ce cycle de préparation pour faire une école d'ingénieur.

Si l'ESME était une école de mécanique et d'électricité, il y avait cependant un cours d'électronique, d'une heure, que j'ai pris en charge pendant un grand nombre d'années. Le successeur de Sudria a voulu ouvrir une section électronique. Il m'a donc demandé de monter cette section, de chercher des professeurs, etc. J'ai pris le cours principal, 5-6 heures par semaine, en électronique de base. J'ai « fabriqué » une centaine d'ingénieurs par an, pendant au moins 20 ans.

Venons-en progressivement à votre arrivée au Cnam... Aigrain a-t-il favorisé ce rapprochement ? Qui

étaient les autres candidats ? Êtes-vous resté lié au BIPM ?

Tout se tient. En 1967, la Chaire a été créée sous l'impulsion d'un ami très proche que j'ai connu *via* Rocard : Pierre Aigrain (1924-2002)³. Rocard avait connu Aigrain en Amérique⁴. Quelques jours après son retour à Paris, il m'a présenté à Aigrain : depuis ce moment, nous sommes restés de grands amis. Il a absolument poussé dans ce sens : il en a parlé à Michel-Yves Bernard⁵ également, et je pense que c'est lui qui a orchestré la création de la Chaire et le suivi des candidatures. C'est ainsi que les deux m'ont invité à déjeuner pour m'inciter à candidater à la Chaire.

Je n'étais pas le seul candidat : le CEA poussait de son côté M. Grinberg. En réalité la Chaire ne m'intéressait pas outre mesure, je ne cherchais pas de travail. Je n'ai jamais intrigué pour être au Cnam. Mais du côté de l'ICRU, Lauriston Taylor voulait aussi que ça fonctionne. Cette situation arrangerait tout le monde, en un sens.

³ Nous renvoyons au texte de Loïc Petitgirard, dans ce numéro, sur le rôle de Pierre Aigrain dans les années 1960, au niveau de la politique scientifique nationale, et la métrologie en particulier.

⁴ Voir texte de Pestre, *ibid.*

⁵ Michel-Yves Bernard (1927-2005) a été professeur titulaire de la Chaire d'électronique au Cnam, à partir de 1962. Il s'est imposé comme une personnalité politique très importante au Conservatoire, et investie dans la politique nationale en recherche scientifique et technique – voir le texte de Loïc Petitgirard dans ce même numéro pour mieux évaluer son rôle dans les transformations du LNE/INM.

J'ai indiqué à M-Y. Bernard et Aigrain, que je réfléchissais à la candidature. Je pensais en particulier en parler à Jean Terrien⁶ qui m'a toujours soutenu au BIPM. Lorsque je suis rentré du déjeuner, Terrien est venu me voir et me demande: « Tiens tu es candidat au Cnam ? ». Il le savait déjà! Je lui ai dit que j'étais désolé qu'il l'ait appris indirectement, mais que je n'avais absolument pas dit oui! Puis j'ai accepté, et suis rentré en 1967, tout en passant à mi-temps au BIPM.

Quel projet aviez-vous pour le Cnam à l'occasion de cette candidature? Quelle incidence votre arrivée a-t-elle eu sur la décision de séparer les aspects recherche des aspects techniques de l'étalonnage entre deux services (INM et LNE)?

L'idée était de donner plus d'ampleur au cours de métrologie. Et deuxièmement, de démarrer un groupe de recherche en métrologie. Indépendamment de moi, il a été décidé qu'un Institut national de métrologie porterait cette recherche. La métrologie était en fait au LNE, du temps où le LNE était Cnam. Et quand ils ont vu ce qui se tramait, les 8/10^e ou 9/10^e des chercheurs ont préféré venir au nouvel Institut, en métrologie. Ce corps a permis de démarrer l'INM. *A contrario*, il y avait des réticences très fortes du côté du LNE. Je n'ai jamais été

très calculateur et en partant du LNE, par exemple, on aurait dû emporter les étalons. On ne l'a pas fait et on a préféré faire du travail de recherche scientifique.

La séparation des tâches de recherche et d'étalonnage entre l'INM et le LNE a probablement résulté d'une décision du directeur du Cnam, M. Guérin à l'époque – je n'ai jamais vraiment eu de confirmation. Dans la tête de certains, peut-être qu'il était question que le professeur de métrologie devienne le directeur du LNE. Mais à ce moment donné, je ne pouvais pas le devenir. Je représentais trop peu vis-à-vis du LNE qui était un très gros laboratoire. M. Guérin a pris cette décision: sortir mon groupe du LNE et mettre à disposition le pavillon des étalons, rue Saint-Martin, pour y faire venir l'équipe. Peu de temps après, le même directeur, ou je ne sais quelle instance supérieure, a créé l'INM, en l'appelant Institut national de métrologie.

À propos des membres de l'équipe dont vous aviez la responsabilité: les connaissiez-vous au préalable? Comment les avez-vous trouvés et sur quels critères les avez-vous recrutés, parmi d'autres candidats? Nous pensons en particulier à Jean Bastie, George Bonnier...

On a fait connaissance à ce moment-là. Il y avait une personne très bien, dont j'ai oublié le nom, qui dirigeait toute cette équipe; elle venait

⁶ Physicien, directeur du BIPM de 1962 à 1967.

de partir à la retraite du LNE⁷ et avait conseillé aux futurs membres de l'équipe d'aller au Cnam. Son adjoint direct était M. André Moser, avec qui j'ai fait l'INM. M. Moser, malheureusement décédé, était le sous-directeur de l'INM. Son équipe de base faisait de la thermométrie ; on a rajouté l'optique, l'interférométrie avec Bouchareine.

J'ai d'abord eu un poste de professeur des universités très rapidement. J'ai prospecté auprès de mes connaissances, et on m'a signalé le nom de Bouchareine. Il était au Laboratoire Aimé Cotton⁸, un gros laboratoire du CNRS (plusieurs personnes d'Aimé Cotton sont venues me rejoindre). C'est ainsi, *via* Aimé Cotton, qu'on a pu démarrer la partie longueur, l'interférométrie. J'ai recruté Jean Bastie ; ne me demandez pas par quel moyen, je ne sais plus. Pour la photométrie, c'est probablement Terrien qui m'a aidé. Bonnier était dans le groupe de Moser, une sorte d'alter ego de Moser. Et puis Hermier qui a été un de mes étudiants.

Je n'ai pas eu de mal à trouver des candidats, mais il faut préciser quelques points. Je faisais un cours à l'université d'Orsay, dans la section Électronique.

C'était un cours général, sur la métrologie, dans un troisième cycle d'électronique. Je l'ai donné pendant plusieurs années, et deux élèves sont venus par ce biais. Yves Hermier en thermométrie et un autre en radiométrie, Bernard Rougié. Ce sont des gens qu'il fallait former. Moser était vraiment un pivot pour ça. Nous avons été rejoints par Paul Riéty qui était le patron de l'acoustique au LNE... il s'est occupé, dans l'INM, des masses, de la mesure des masses. Il était Polytechnicien et c'était un très, très bon scientifique, hors pair.

Une partie du personnel venait du LNE, situé au Cnam : est-ce que cela explique que vous ayez bénéficié de moyens, notamment financiers ? Quelles étaient vos relations avec d'autres professeurs du Cnam et avez-vous construit des choses en commun ?

Il était question déjà à ce moment-là de la scission du LNE, pour partir du Cnam. Pour qu'on ait des moyens, il fallait des postes. Il y a eu un transfert du LNE à l'INM, mais j'aurais pu remplir ces postes avec d'autres. J'étais déjà très ravi de travailler avec des gens du LNE, mais j'aurais pu faire autrement.

Je ne peux pas dire qu'il y ait eu un programme ou un projet commun. Je n'en ai plus en tête. J'avais de très bons rapports avec Jean-Jacques Veysse⁹ (physique du

⁷ Il s'agit très probablement de Maurice Bellier – voir le texte de Loïc Petitgirard dans ce numéro.

⁸ 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.

⁹ Professeur titulaire de la Chaire de physique du froid au Cnam, nommé en 1967.

froid), parce que c'était un physicien, mais il n'y a pas eu de collaborations.

Le départ du LNE dans les années 1970 vous a-t-il posé des problèmes? Cela a-t-il changé la trajectoire de l'INM? Quels succès et/ou échecs retenir-vous de ces dix premières années?

Ce départ n'a rien changé. Par ailleurs, je ne peux pas parler de véritables échecs. L'interférométrie a été un succès total, avec Patrick Bouchareine, et son successeur qui venait d'Aimé Cotton lui aussi. Des succès au point de vue scientifique... Je ne parle pas du point de vue administratif et politique.

À propos de votre enseignement au Cnam: aviez-vous beaucoup d'élèves (en thèse ou en diplôme d'ingénieur)? Pensez-vous avoir marqué les esprits? Comment avez-vous construit votre cours au Cnam?

Il y avait beaucoup d'élèves, dans les niveaux A et B. Les élèves en physique suivaient tous ces cours, à cette époque-là. Quelques dizaines de personnes aisément.

J'ai fait beaucoup de cours, partout et en particulier un dont je suis un tout petit peu fier – parce qu'on m'a rapporté les mots du directeur du Centre CEA de Saclay (probablement Jean Debiesse), à mon arrivée au Cnam, avant mon élection. Il indiquait alors que j'assurais un

cours à l'Institut national des sciences nucléaires (INSTN) qui était suivi par les gens de Saclay, ce qui est extrêmement rare ! Et c'était vrai.

J'ai eu beaucoup de chance, à propos du cours que j'assurais. Au démarrage de l'ICRU, dans la commission des unités, il y avait des discussions sur ce qu'on appelle une grandeur physique, sur la nomenclature en physique. Ceci est une chose qui n'était absolument pas utilisée en France. On ne m'a jamais appris, en France, ce qu'était une grandeur physique, ni les règles qui gouvernent les grandeurs physiques. Je l'ai appris au plan international avec la clarté d'un système développé principalement chez les Anglo-saxons et chez les Allemands. Introduire ces notions dans le langage français a appris beaucoup de choses aux physiciens et métrologues. La qualification des incertitudes, le traitement des incertitudes est un point très important que j'ai pu discuter au sein de l'ICRU. C'était une réflexion très développée en dehors de la France, mais peu en France.

Cette question concerne toute la métrologie, et votre rôle est important à ce niveau. Pensez-vous que cela marque un changement majeur en métrologie? Comment ont évolué les mentalités en France à ce sujet?

Pour notre pays, oui, cela a été très important. Je suis obligé de dire qu'on rencontre des gens qui ont suivi mon cours et qui en parlent toujours. Je

trouve que ce n'est pas normal qu'un professeur de physique ne donne pas un certain cadre de la physique. C'est ce qui était dans mon cours et qui a marqué les esprits. Mon mérite, je pense, n'est pas à ce niveau, mais d'avoir pu assimiler ce contenu grâce aux personnalités de très grande qualité rencontrées dans les comités internationaux. Je me rappelle encore le cours que j'ai fait à Saclay pendant de très nombreuses années : je souhaitais le faire, mais uniquement pour rendre service à mon pays, parce que j'avais un amas d'informations qui me venait gratuitement de l'extérieur, et dont les autres scientifiques ne bénéficiaient pas. J'ai expliqué à Terrien qu'il me plairait beaucoup d'exposer ces éléments de physique et de métrologie. C'est grâce à lui que j'ai pu assurer le cours à l'INSTN. Au fond, j'étais tout simplement animé du désir d'atteindre le même niveau chez nous qu'ailleurs.

Il existait un cours de métrologie avant votre arrivée au Cnam : l'avez-vous consulté ? Quel changement avez-vous introduit dans l'établissement ? Est-ce que le Cnam a été un bon lieu pour diffuser une culture de la métrologie ?

Il n'y avait pas de document à proprement parler que l'on pouvait consulter, mais surtout des « descriptions des étalons », etc. Je pense avoir introduit un changement, ce qui ne veut pas dire que c'était inintéressant avant. On peut reprocher au précédent cours, par exemple, de

ne pas traiter de la métrologie de laboratoire, sujet beaucoup plus abstrait. Et nous avons fait des travaux pratiques bien sûr. Par exemple je n'ai pas fait de cours sur la règle étalon, les masses, ou alors ces points ont été traités beaucoup plus rapidement.

Le Cnam était un environnement favorable, puisqu'il s'agit ici vraiment de la métrologie pure. La métrologie ne peut pas exister sans une analyse rigoureuse des incertitudes. Dans un polycopié d'un cours probablement délivré au CERN, à Genève, j'avais découvert la méthode des fonctions réciproques. Tout le monde connaissait la méthode des moindres carrés, mais cette méthode est beaucoup plus évoluée. J'ai construit un cours de niveau C au Cnam, sur cette question ; l'ouvrage correspondant est toujours consulté à la bibliothèque, et grâce à Google on le trouve en ligne sur Internet. Cette méthode est extrêmement utile pour extraire un grand nombre d'estimateurs statistiques d'une série de données. Pas simplement la moyenne ou l'écart-type.

Avez-vous utilisé, pratiqué, développé les techniques informatiques ? Y avait-il un ordinateur destiné à cela au Cnam ? Quelles relations entreteniez-vous à ce sujet avec les autres chaires, en particulier la Chaire de programmation ?

Je dois dire que j'ai exigé qu'il y ait un ordinateur, à l'époque où les ordinateurs étaient encore mécaniques. Il existait au Cnam une machine italienne

(Olivetti P101), à 120 instructions, que l'on utilisait dans les travaux pratiques de métrologie, dès le départ. J'étais tombé un peu par hasard sur cette machine, sans lien avec la Chaire de programmation. J'étais enthousiaste, je voulais faire des petits programmes avec les quelques 120 instructions mécaniques. Puis, au niveau du laboratoire on a eu très rapidement un ordinateur électronique.

À propos de votre action au plan national: avez-vous participé au BNM? Représentiez-vous la dosimétrie? Considérez-vous avoir mis à niveau la Métrologie française à travers toutes ces actions?

Le BNM était une instance très importante. Je crois que je représentais l'INM au BNM. Je n'ai jamais rien fait d'officiel en dosimétrie, à part des cours.

Je ne sais pas si l'on peut dire que j'ai mis à niveau la Métrologie française. Mais il est vrai qu'on avait beaucoup de choses à apprendre!



| Varia

Qui est le public du Musée des arts et métiers ? Une analyse de la visite muséale comme bien d'expérience

Rebecca Amsellem

Économie et Société, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et HT2S, Cnam¹.

Résumé

Cette étude a pour objectif de définir la demande du Musée des arts et métiers grâce à une enquête des publics réalisée entre décembre 2013 et mars 2014, en proposant une méthodologie d'enquête applicable aux musées. Par ailleurs, cette enquête permet de démontrer que la visite muséale est un bien d'expérience : des faisceaux d'indices traditionnels sont utilisés pour diminuer l'incertitude de satisfaction de la visite.

Introduction

Si le Musée des arts et métiers est tout d'abord un dépôt de machines, modèles, outils et documents sur le savoir-faire des arts et métiers² (Ferriot Jacomy, 1998), le Musée a toujours privilégié sa relation avec son public. Initialement rattaché au Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) créé en 1794, l'objectif premier du Musée est de proposer aux inventeurs et ingénieurs des objets leur permettant de stimuler leur imagination et de comprendre les mécanismes utilisés. Il faut s'en inspirer et les dépasser. En 1802, les galeries du musée s'ouvrent au grand public (Corcy, 2010) après que la direction du Cnam décide de retirer ses objets des cours et des démonstrations techniques pour les conserver. Sous la Restauration, cette collection devient l'objet d'études et est

¹ Cette étude a été réalisée grâce à la bourse Immersion du LabEx Création Art Patrimoine (CAP, Comue Hésam) et à une bourse de la Fondation pour les monuments historiques.

² Extraits du décret du 10 octobre 1794. Conservatoire national des arts et métiers. Décret 88-413 modifié portant sur les missions statutaires du musée et du Cnam.

utilisée afin d'enseigner aux étudiants l'évolution des techniques ainsi que celle de l'inventivité. Arthur-Jules Morin, directeur du Cnam entre 1852 et 1880, impulse une nouvelle conception à la collection. Il veut attirer un public plus large. Il installera par exemple des machines à vapeur en marche dans l'église. C'est un succès immédiat³.

Aujourd'hui, la collection compte 80 000 objets, 15 000 dessins et plans techniques ; c'est celle-ci qui donne aujourd'hui au musée sa « *légitimité* » et sa « *richesse* » (Ferriot et Jacomy, 1998). La particularité du Musée des arts et métiers est d'avoir un sujet d'étude très spécialisé – les métiers et objets techniques – tout en s'adressant à un public large. Cette politique va de pair avec la distinction des départements « Conservation » et « Exposition », ainsi que l'affirmation, entre autres, des pédagogies actives comme matrice d'innovation (Eidelman, 1992). Comme énoncé précédemment, le public initial du musée est un public d'étudiants et de chercheurs qui avaient seuls accès aux collections du musée et manipulaient les objets afin d'en comprendre les mécanismes. Nous supposons le public d'aujourd'hui, et ses pratiques, différents depuis la dernière étude réalisée par l'Observatoire permanent des publics⁴ (OPP), quelque

temps après sa réouverture. Nous supposons également la visite muséale comme étant un bien d'expérience. Le bien muséal est un objet particulier. En effet, le visiteur du musée ne peut connaître la satisfaction que lui procurera la visite d'une collection ou d'une exposition temporaire. Il connaît cette satisfaction uniquement une fois consommé ce bien.

Dix ans après la publication de la dernière analyse des publics du Musée, l'objectif est de mettre en lumière les caractéristiques sociodémographiques des visiteurs afin de fournir les bases d'une analyse ultérieure des pratiques muséales. Plusieurs interrogations guident notre réflexion : pourquoi et comment le Musée s'est-il intéressé à la question des publics ? Comment pourrait-on définir le profil socio-économique du public du Musée ? De quelle manière les résultats de cette enquête nous permettent-ils de confirmer l'hypothèse selon laquelle la visite muséale est un bien d'expérience ?

Afin de mettre en perspective les résultats de l'enquête, certains résultats de l'étude réalisée entre décembre 2013 et mars 2014 pourront être comparés à deux études précédentes. La première, réalisée avant la rénovation du Musée et intitulé « Représentations et attentes des visiteurs du Musée national des arts et métiers », a été publiée en 1992 par l'Association Expo

3 Entretien avec Alain Mercier, ingénieur de recherche au Musée des arts et métiers (Cnam), 8 avril 2014.

4 Observatoire Permanent des Publics (2001). Musée des arts et métiers. Tableaux des résultats globaux. 1^{er} juin — 4 novembre 2001. Paris : ARCMC. Cet observatoire est mis en place au début des années 1990

par le cabinet de conseils ARCMC (Analyse Recherche et Conseil en Marketing et Communication) dans plus de cent musées en France avec pour objectif de proposer aux institutions muséales des outils d'identification de leur public et de ses pratiques.

Média International, sous la direction de Hana Gottesdiener et Jean Davallon. Il s'agit d'une enquête qualitative ayant pour vocation de connaître les représentations qu'a le grand public du musée (et non les caractéristiques du public). La méthodologie choisie est originale puisqu'elle recourt à un comportement qui traduit l'appropriation des objets exposés par le visiteur⁵ et utilise ce support comme base d'entretiens. La seconde a été produite par l'Observatoire permanent des publics pour le Musée au printemps 2001, après la rénovation. Le rapport a étudié les publics du Musée afin d'analyser les caractéristiques, les pratiques et le niveau de satisfaction des visiteurs.

Ces études n'observent pas la même méthodologie, le même protocole et portent sur des échantillons de taille et caractéristiques variables. Néanmoins, s'il n'est pas possible de comparer l'ensemble des trois études, les données pourront parfois être mises en parallèle.

Méthodologie et protocole d'enquête

Pour le Musée des arts et métiers, investir la question des publics permet de faciliter la diffusion de la culture scientifique et technique dans la société,

d'inciter les jeunes générations à s'intéresser aux métiers scientifiques et de développer la symbolique muséale. En bref, de répondre à ses missions. Le public d'un musée est l'ensemble des individus et des groupes ayant un usage du musée (Le Marec, 2007). Cette notion regroupe les visiteurs d'une exposition temporaire ou d'une collection permanente, mais également les participants aux activités culturelles proposées par le musée (ateliers, conférences, démonstrations...). Nous pouvons ajouter que ce public fait partie d'une société avec laquelle le musée développe une relation.

Méthodologie

Si plusieurs outils sont susceptibles d'identifier le public muséal et ses pratiques – la billetterie du musée, les locations d'audio-guides, le livre d'or, les adhérents... – la méthodologie choisie est la technique largement répandue du questionnaire auto administré. Le questionnaire de deux pages (annexe I) a été créé pour être suffisamment court et ainsi inciter les visiteurs à y répondre. L'enquête quantitative par questionnaire auto administré est très fréquemment utilisée pour établir une description générale des publics des institutions culturelles (octobre, 2011).

Nous avons pu réunir des informations sur les éléments suivants: les circonstances de visites (antécédents de la visite, primo visite, occasions aux-

⁵ Les visiteurs interrogés se voyaient remettre un Polaroid avec lequel ils devaient prendre en photo les objets les plus marquants de la collection. Un entretien s'en est suivi où les visiteurs devaient expliquer la raison de leur choix.

quelles le visiteur s'est déjà rendu au musée, prise de connaissance initiale du musée), les caractéristiques de la visite (objet de la visite, accompagnants du visiteur et objectifs de la visite), les caractéristiques du visiteur (sexe, nationalité, lieu de résidence, âge et catégorie socioprofessionnelle), appréciation du musée (interaction du visiteur avec les objets, niveau général de satisfaction, appréciation des services annexes comme l'accueil ou le café); éléments postérieurs à la visite (disposition à revenir et recommandations d'évolution du musée). Une phase de test nous a permis de réaliser des amendements au regard des commentaires des différents départements du musée et de faire des changements suite aux commentaires des visiteurs.

Les études de public peuvent nourrir les politiques d'accueil et de médiation et peuvent se traduire en politiques opérationnelles comme la modification des tarifs, les horaires du musée, ou encore l'accueil du public (Eidelman, 2007). Celle-ci a pour objectif de connaître les usagers et de déterminer les représentations qu'ils se font du musée. Entre décembre 2013 et mars 2014 – pendant l'exposition temporaire « Mecanhumanimal »⁶ – le public a été invité à répondre à l'enquête proposée.

6 Cette exposition est une rétrospective dédiée au dessinateur Enki Bilal, pensée en interaction avec la collection d'objets techniques et scientifiques du musée.

Déroulement de l'enquête

Le questionnaire a été distribué trois fois pendant une période de deux semaines : les vacances de Noël – entre le mardi 24 décembre et le dimanche 5 janvier – une période hors vacances – entre le mardi 21 janvier et le dimanche 2 février – et enfin pendant les vacances de février – entre le mardi 25 février et le dimanche 9 mars.

Le questionnaire a été diffusé du mardi au dimanche (jours d'ouverture du musée), chaque jour, à deux moments de la journée : une première fois à 10 heures et une seconde fois à 15 heures. À chaque fois, quinze questionnaires ont été distribués, indépendamment des caractéristiques du visiteur, à raison d'un exemplaire par groupe individuel – visiteurs individuels venus ensemble au Musée des arts et métiers – et quatre exemplaires par groupe organisé⁷. Le questionnaire était disponible en français et en anglais. Les agents d'accueil ont accompagné la remise du questionnaire à la caisse du discours suivant : « *Nous vous invitons à remplir ce questionnaire à la fin de la visite et à le remettre à un membre du personnel de la boutique avant de quitter le musée. Un bon pour un café/thé ou un goodie⁸ vous sera alors remis.* » Le membre du personnel

7 La notion de groupe organisé est définie comme un ensemble de visiteurs ayant organisé au préalable sa visite – via un organisme tiers ou non – et bénéficiant des tarifs réservés à cette catégorie de personnes.

8 Il s'agit d'un petit cadeau remis par le musée, en l'occurrence un crayon de charpentier ou une règle en bois.

de la boutique a réceptionné les questionnaires à la boutique, a proposé au visiteur le bon mentionné et a apposé à la fin du questionnaire la date de remise du questionnaire (dans un espace prévu à cet effet).

Le protocole a été suivi et 345 questionnaires ont pu être exploités (questionnaires dûment remplis). Le taux de retour de l'enquête a été de 38 % (annexe II).

L'ensemble des questionnaires a fait l'objet d'une numérisation des données et les réponses sont indiquées sous la forme de schémas ou graphiques tout au long de cet article. Enfin, les résultats ont été analysés avec l'aide du directeur, Serge Chambaud, des responsables de départements du Musée des arts et métiers et des membres du laboratoire HT2S (Histoire des technologies en société) du Cnam⁹.

Profil socio-économique du public du Musée des arts et métiers

Différents critères démographiques permettent d'identifier le public du musée : le genre, l'âge, la profession, la nationalité et le lieu de résidence.

⁹ L'implication des différents partenaires professionnels et chercheurs est rendue possible par la logique d'immersion de la bourse du LabEx CAP.

Genre

Le genre n'apparaît pas comme étant un facteur déterminant dans la visite du Musée des arts et métiers : le nombre de femmes et d'hommes est sensiblement identique. Néanmoins, nous pouvons remarquer une féminisation du public depuis 2001, année de la dernière enquête du public réalisée au Musée. Les femmes représentaient alors 41 % des personnes interrogées et les hommes 59 %.

Âge

L'âge n'est pas non plus un facteur exploitable pour analyser le public du musée (tableau 1). Les tranches d'âge les plus représentées sont les 26-35 ans (19 %) et 46-55 ans (19 %). Les jeunes de moins de 25 ans représentent 25 % des visiteurs du musée. Sur l'année, si l'on s'en réfère aux chiffres de billetterie, le taux des jeunes de moins de 26 ans (jusqu'à 25 ans) représente environ 40 %. Cette différence peut s'expliquer par la pratique qui a démontré que le questionnaire n'a été que très peu rempli par les enfants.

Origine géographique des visiteurs

La très grande majorité des personnes interrogées est de nationalité française (83 %). Les autres visiteurs interrogés ont des nationalités variées (tableau 2). On observera que les visiteurs italiens représentent près de 10 % des visiteurs étrangers, de même que les Anglais.

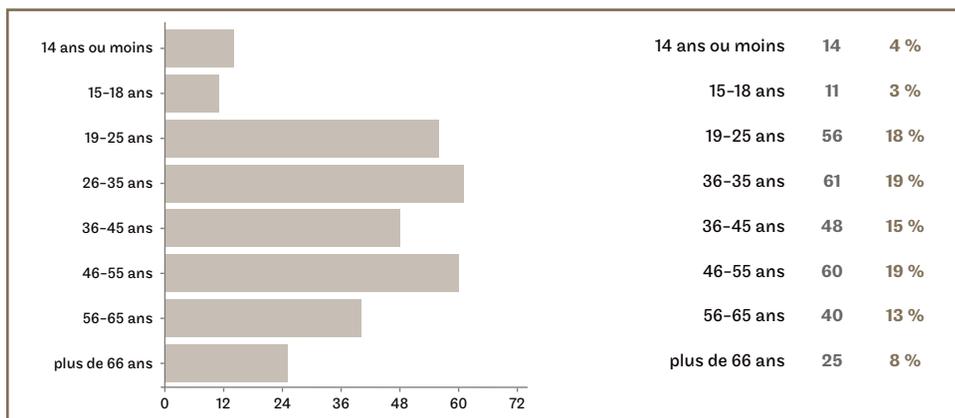


Tableau 1
Répartition par âge des visiteurs interrogés

NATIONALITÉ	POURCENTAGE VISITEURS	NATIONALITÉ	POURCENTAGE VISITEURS
Allemande	1,85 %	Finlandaise	1,85 %
Américaine	5,56 %	Irlandaise	1,85 %
Anglaise	9,26 %	Israélienne	1,85 %
Australienne	5,56 %	Italienne	9,26 %
Autrichienne	3,70 %	Japonaise	1,85 %
Belge	5,56 %	Néo-Zélandaise	1,85 %
Birmane	1,85 %	Polonaise	3,70 %
Bésilienne	5,56 %	Qatari	1,85 %
Bulgare	1,85 %	Russe	5,56 %
Canadienne	5,56 %	Suisse	1,85 %
Chinoise	3,70 %	Thaïlandaise	1,85 %
Colombienne	1,85 %	Vénézuélienne	1,85 %
Croate	1,85 %	Ne se prononce pas	7,41 %
Écossaise	1,85 %		

Tableau 2
Représentativité des nationalités autres que française parmi les visiteurs interrogés

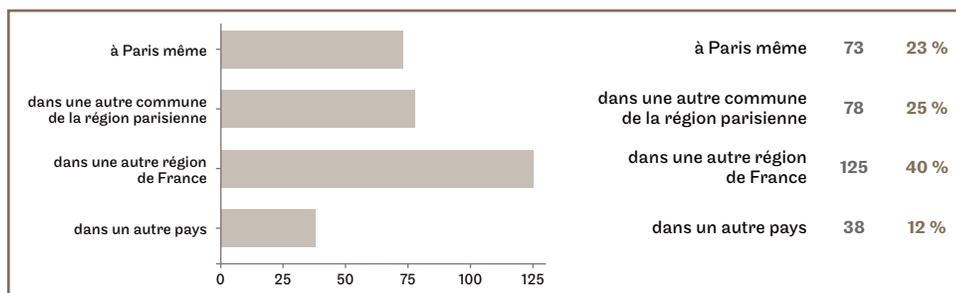


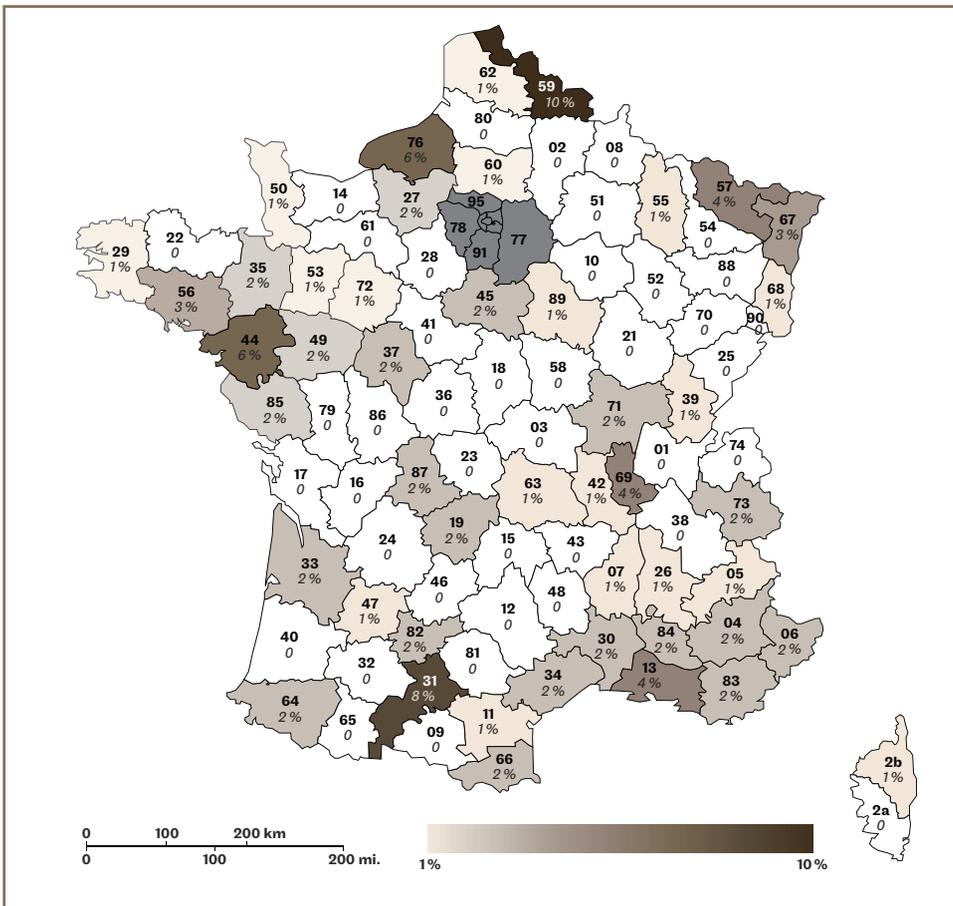
Tableau 3
Répartition du lieu de résidence des visiteurs interrogés

Un quart des visiteurs est issu de Paris, un autre quart de la région parisienne, 40 % des visiteurs proviennent de régions françaises variées (tableau 3). Les autres viennent (entre autres) des pays suivants : Royaume-Uni, Australie, Belgique, Birmanie, Brésil, Canada, Chine, Colombie, États-Unis, Irlande, Italie, Japon, Nouvelle-Zélande, Pologne, Qatar, Russie, Suisse, Venezuela.

visiteurs venant de Paris et de la région parisienne (48 %) et ceux venant d'une autre région française (40 %). Comme le montre la carte ci-dessous, 10 % des personnes habitant en France (hors Paris et région parisienne) viennent des départements Nord (10 %), Haute-Garonne (8 %) et Haute-Normandie (6 %). Ainsi, une large partie du territoire français est représentée dans le public du musée.

En ce qui concerne le lieu de résidence, on observe un équilibre entre les

Les résultats de l'enquête de 2001 montrent que 30 % des visiteurs



Carte 1

Représentativité des personnes habitant en France (hors Paris et région parisienne)

viennent de Paris même et 26 % d'une autre commune de la région parisienne. Ceux venant d'une autre région représentent 29 % et d'un autre pays, 14 %. On observe donc une baisse tendancielle des personnes habitant en région parisienne (56 % contre 48 %) et une augmentation significative des personnes habitant en région (29 % contre 40 %). La proportion des personnes venant d'un autre pays est quasi stable (14 % contre 12 %).

Des entretiens avec les responsables du Musée permettent d'interpréter ces résultats. Tout d'abord les régions d'origine sont fortement industrialisées ou post-industrielles (le nord et l'est de la France). Par ailleurs, la présence des centres régionaux du CNAM sur le territoire pourrait inciter les élèves à visiter le musée une fois à Paris.

Catégories socioprofessionnelles

Outre la catégorie « élèves et étudiants », les catégories socioprofessionnelles les plus représentées sont les « cadres supérieurs » (23 %) puis les « enseignants » (13 %).

Nous ne pouvons comparer ces résultats avec ceux de l'étude des publics de 2001 car la partie consacrée au statut professionnel comportait une première question sur le statut (actif, retraité, étudiant...) et une seconde sur la catégorie socioprofessionnelle (profession actuelle ou passée). Or, dans notre étude il a été uniquement demandé de choisir – parmi les suggestions proposées – sa profession actuelle.

Nous pouvons néanmoins comparer les réponses liées au statut. Les retraités

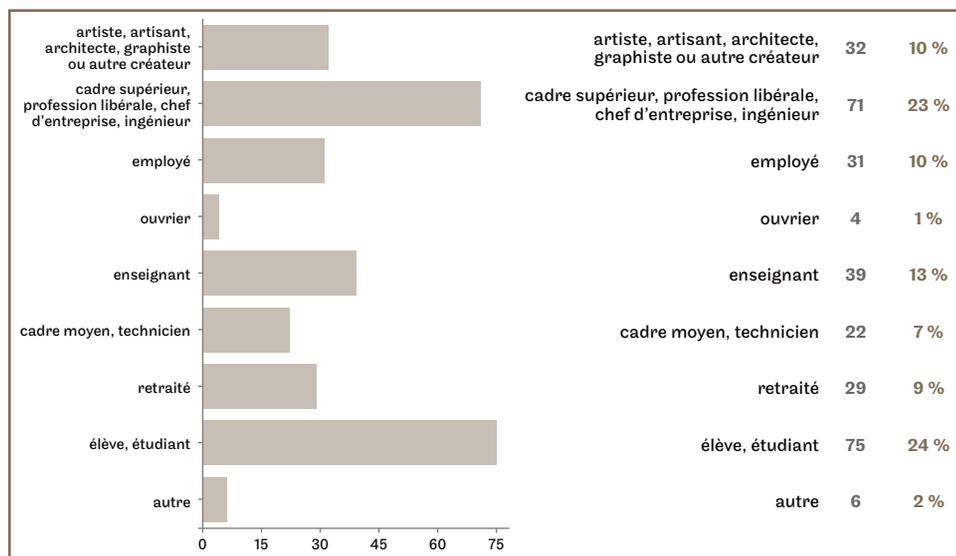


Tableau 4

Représentation des professions parmi le public interrogé

représentaient, en 2001, 19 % des visiteurs interrogés, ils en représentent 9 % aujourd'hui. Plusieurs raisons ont été évoquées par les responsables du Musée : l'exposition temporaire « Mecanhumanimal » attire un public intéressé par la bande dessinée, un public jeune. Par ailleurs, il n'existe plus de réduction destinée aux retraités. Une autre raison pourrait être que les retraités ne se retrouvent plus dans la nouvelle disposition des collections depuis la réouverture du musée.

Les « étudiants et élèves » représentaient 11 % des visiteurs et en représentent 24 % dans l'enquête actuelle. Néanmoins, l'enquête de 2001 s'adressait aux plus de 15 ans alors que l'enquête 2014 n'avait pas de seuil d'âge requis.

Pratiques culturelles *in situ*

Coulangeon définit les pratiques culturelles comme « *l'ensemble des activités de consommation ou de participation liées à la vie intellectuelle et artistique, qui engagent des dispositions artistiques et participent à la définition des styles de vie : lecture, fréquentation des équipements culturels (théâtre, musées, salles de cinéma, salles de concerts...), usages des médias audiovisuels, mais aussi pratiques culturelles amateurs* » (Coulangeon, 2010). Nous étudions ici les pratiques du visiteur sous deux angles principaux : la typologie de fréquentation et le style de consommation.

Une partie de l'enquête aborde les interactions entre visiteurs et objets exposés. La méthodologie d'enquête communément usitée pour étudier ces pratiques est celle de l'observation. Néanmoins, ces premiers résultats pourront guider des études futures sur le sujet. Selon l'enquête, la majorité des visiteurs (60 %) visite en famille ou en couple ; les restants visitent seuls (22 %) et entre amis (17 %). Il n'y a que peu de groupes représentés dans cette enquête.

Si le musée des beaux-arts s'efforce de provoquer une émotion grâce à ses tableaux, le musée scientifique et technique scénarise davantage sa collection grâce aux outils de médiation afin d'aider le public à appréhender les objets exposés. Ces pratiques se reflètent sur les comportements du visiteur dans l'enceinte muséale. La très grande majorité des visiteurs visite l'exposition et s'informe en lisant les textes d'accompagnement (77 %). Près de 15 % des visiteurs interrogés participent aux visites guidées gratuites. Cette proportion pourrait s'expliquer par le fait que le Musée des arts et métiers est un des seuls musées à proposer ce type d'activité gratuite (en effet, la collection est difficilement compréhensible pour un amateur, les seuls cartels n'aidant pas le visiteur à comprendre les objets). Les outils habituels de médiation sont peu plébiscités par les visiteurs. En effet, peu indiquent qu'ils prennent l'audioguide (6 %) ou qu'ils utilisent leur *smartphone* pour accompagner leur visite (5 %). On remarque néanmoins que la proportion de per-

sonnes qui prend l'audioguide est quasi équivalente à celle des personnes qui utilisent leur *smartphone*. Enfin, les utilisateurs partagent l'information avec leur cercle d'amis ou sur les réseaux sociaux (21 % des interactions invoquées). Les autres modes d'interaction avec les collections et l'exposition indiqués par les sondés sont le dessin, la lecture d'autres ouvrages, ou encore la participation aux jeux proposés.

La visite muséale comme bien d'expérience

La visite muséale est un bien d'expérience. Le consommateur connaît la satisfaction que lui procure la consommation de ce bien uniquement une fois consommé. Nelson (1970) a proposé pour la première fois une typologie de biens ou service où les caractéristiques du produit, comme la qualité ou le prix, sont difficiles à évaluer par le consommateur avant la consommation du bien. Nelson fait la distinction entre les biens de recherche (*search product*) où l'information est facilement évaluée avant l'achat et les biens d'expérience, pour lesquels l'information est connue après la consommation du bien. En effet, le visiteur du musée ne peut connaître la satisfaction que lui procurera la visite d'une collection ou d'une exposition temporaire. L'incertitude du marché conduit à la mise en place de faisceaux d'indices permettant au consommateur de prendre une décision (Karpik, 2009).

Des intermédiaires vont ainsi procéder à des évaluations indépendantes sur lesquels les consommateurs vont baser leur décision. Cinq catégories de dispositifs sont identifiées : les labels, les critiques, les classements, les dispositifs d'accueil, et les réseaux du consommateur.

Nous faisons l'hypothèse que les visiteurs potentiels utilisent non seulement ces faisceaux d'indices pour diminuer l'incertitude de satisfaction de la visite mais également de nouveaux faisceaux d'indices. Par ailleurs, la perception de la marque par les visiteurs devient un des trois faisceaux d'indice spécifiques à la visite muséale.

Visiteurs et faisceaux d'indices traditionnels

Les réseaux (relations interpersonnelles), les appellations (labels), les cicérones (critiques guides), les classements (prix et box-office), et les confluences (organisation du lieu de vente) sont des dispositifs traditionnels de jugement des biens d'expérience (Karpik, 2009). Ces dispositifs sont basés sur la confiance des consommateurs envers l'indépendance de ces dispositifs. Les résultats de l'enquête montrent que les visiteurs du musée ont pris connaissance de l'existence du musée *via* ces dispositifs connus : le bouche-à-oreille (réseaux), les articles de presse (cicérones) ou encore la publicité.

Près de la moitié des visiteurs (43 %) a pris connaissance de l'exis-

tence du musée *via* le bouche-à-oreille. Ceci pourrait indiquer que la notoriété du musée est forte, que le public a tendance à apprécier l'expérience de sa visite et à transmettre cette information à son entourage et que la communication institutionnelle du musée pourrait être plus développée. Si l'on compare les résultats avec l'enquête de 2001 on remarque que le bouche-à-oreille est bien plus important aujourd'hui qu'en 2001 (alors 29 %). Internet est également plébiscité par une partie du visitorat pour préparer sa venue. Internet était plébiscité par 6 % des visiteurs en 2001 contre 16 % aujourd'hui.

Par ailleurs, la notoriété du Cnam et de son musée est une des prises de connaissance invoquées (3 % des visiteurs). L'auditeur – ou ancien auditeur – n'hésite pas à mentionner l'appartenance à l'établissement comme raison de sa venue. Il est à noter que ces réponses n'étaient pas proposées dans le questionnaire, il s'agit de réponses spontanées.

Ainsi, les moyens traditionnels de réduction d'incertitude (notamment les réseaux et les confluences) proposés par Karpik se reflètent dans l'enquête.

La marque, autre faisceau d'indices pour les consommateurs de biens d'expérience

Dans le secteur muséal, la marque, identifiée par son nom et son logo, est un des faisceaux d'indices qui vont conduire

le consommateur à visiter le musée. Ce signe permet de réduire l'incertitude du consommateur. De plus, la marque engendre la fidélisation (Wallace, 2006).

La marque est « *une combinaison de mots, de design, de symboles et de signes, employée à créer une image qui identifie un produit ou un service afin de le différencier de ses concurrents, et qui, avec le temps, devient synonyme de crédibilité, de qualité et de satisfaction dans l'esprit du consommateur* » (Chiaravalle *et. al*, 2006). La marque est alors un signe distinctif permettant au consommateur de distinguer le produit ou service d'une entreprise de ceux proposés par les entreprises concurrentes. L'enquête permet d'identifier les symboles évoqués par le musée auprès des visiteurs ainsi que le souhait pour ces derniers de revenir.

À première vue, le musée semble évoquer les choses et savoirs du passé, l'histoire et l'évolution des techniques qui est d'être la vocation première de ce musée. Il a été demandé aux visiteurs interrogés de définir ce que représente, pour eux, le Musée des arts et métiers. Cette méthode a été inspirée de celle utilisée au Victoria & Albert Museum en 2002 par Sir Mark Jones, alors directeur du musée, et Wolff Olins¹⁰.

¹⁰ V&A Podcast, « Branding the Museum » par Whitmore, Damien, Director of Public Affairs and Programming, Season 1, episode 2, <http://www.vam.ac.uk/content/articles/v/v-and-a-podcast-branding-the-museum/>.

Ainsi, les visiteurs ont répondu que le Musée des arts et métiers représente :

1. De la connaissance.
2. De l'enrichissement personnel.
3. Une histoire de l'invention et de l'inventivité.
4. De la créativité.

Cette représentation permet de confirmer la position du musée comme temple du savoir et d'identifier les bases de la relation public-musée (qui pourra être étayée lors d'une enquête future basée sur une méthodologie d'observation). Le visiteur voit dans le musée un moyen pour s'enrichir personnellement, acquérir du savoir. Il y voit également « une histoire de l'invention et de l'inventivité », allant de pair avec la mission du musée de contribuer à la recherche scientifique en histoire des techniques. Enfin, le musée est synonyme de créativité, de nouveauté. En 1992, lors de l'enquête menée sous la direction de Hana Gottesdiener et Jean Davallon sur le public du musée¹¹, il est indiqué que l'identité du musée n'est pas clairement définie dans l'esprit du visiteur ce qui a notamment amené le musée à changer de nom. Ce n'est plus le « Musée national des techniques », nom d'alors, mais le « Musée des arts et métiers » qui est retenu. Par ailleurs, le Musée y est le « musée des techniques » par excellence. Néanmoins,

il ne véhicule plus les mêmes valeurs. Le terme « technique » fait place à celui de « connaissance » ou d'« invention ».

La fidélisation est un des chantiers du musée. S'il avait été démontré que les institutions scientifiques et techniques ne renouvellent leur public que « dans une proportion stable et minoritaire »¹² (Eidelman, 1992), le musée fait aujourd'hui figure d'exception. Le musée attire une très large majorité de nouveaux visiteurs, 71 % se déclarant être des primo-visiteurs. Cette tendance s'est accentuée depuis 2001, où 64 % des visiteurs déclaraient venir pour la première fois. Cette capacité à attirer un public nouveau témoigne de la dynamique du musée. Le choix d'une exposition temporaire ayant pour thématique d'ensemble le lien entre la bande dessinée (rétrospective d'Enki Bilal) et la collection, est symptomatique de cette attraction. Cela souligne néanmoins les difficultés du Musée à faire revenir son visitorat. Enfin, le public se dit prêt à revenir dans les deux prochaines années (pour 86 %). En 2001, 92 % des personnes interrogées pensent revenir au musée au cours des prochaines années (sans préciser un nombre) et 60 % pensent revenir au cours des douze prochains mois.

Enfin, nous pouvons noter que les visiteurs du Musée des arts et métiers

¹¹ Gottesdiener H. et Davallon J. (1992). *Représentations et attentes des visiteurs du Musée National des Techniques* (Conservatoire national des arts et métiers), Rapport remis au Musée national des techniques.

¹² Eidelman fait le constat que le public du Museum d'histoire naturelle est renouvelé pour 1/6^e et celui du Palais de la Découverte pour 1/3 alors que la CSI, élargit davantage son audience avec une part pour les primo-visiteurs s'établissant à 44 % en 1991.

sont attirés par la nouveauté davantage que par les collections permanentes. Si l'on compare les résultats avec l'enquête de 2001, on remarque qu'il y a une nette hausse de la venue des visiteurs pour l'exposition temporaire (44 % cette année contre 20 % en 2001) et une baisse pour les collections (34 % des visiteurs cette année contre 45 % en 2001). Cette différence peut s'expliquer par la réouverture du musée en 2001 après de longues années de rénovation. Le public revenait alors pour découvrir la nouvelle disposition des collections. Aujourd'hui, le public est attaché aux expositions temporaires.

Ainsi, les différents faisceaux d'indices confirment que la visite muséale est un bien d'expérience. Par ailleurs, les consommateurs, même s'ils sont attachés à l'institution, tendent à exprimer un souhait de nouveauté au travers de la fréquentation des expositions temporaires.

Conclusion

Le premier objectif de cette étude était de définir la demande du Musée. Nous savons désormais que 70 % des répondants sont des primo-visiteurs; 85 % des visiteurs déclarent leur intention de revenir au musée au cours des deux prochaines années. Par ailleurs, la majorité des visiteurs ont pris connaissance du musée *via* le bouche-à-oreille (43 %) et 44 % des visiteurs viennent au musée parce que le sujet de l'exposition tem-

poraire les intéresse. Pour 33 % d'entre eux, l'objectif de la visite est de passer un moment agréable. Enfin, le public du musée est un public satisfait: 98 % des visiteurs ont aimé l'expérience de leur visite, 92 % affirment avoir appris quelque chose de nouveau grâce à leur visite et en termes de suggestions d'évolution, la majorité suggère davantage de démonstrations d'objets (49 %), des supports d'information plus interactifs et complets (30 %) et plus de communication autour des visites guidées gratuites (26 %).

Le comportement des visiteurs permet d'identifier la visite muséale comme étant un bien d'expérience. En effet, les faisceaux d'indices traditionnels sont utilisés pour diminuer l'incertitude de satisfaction de la visite. Nous avons également identifié des faisceaux d'indices spécifiques à la visite muséale.

Afin de compléter cette première approche de l'étude des publics au Musée des arts et métiers, une étude d'observation des pratiques serait intéressante pour comprendre les comportements du visiteur dans l'enceinte du musée et la relation qui le lie à l'institution et, une seconde étude des publics du Musée pourrait être consacrée aux usages des dispositifs numériques de médiations.

Bibliographie

Chiaravalle, B. et Findlay Schenck, B. (2006). *Branding for Dummies, Hoboken*. New Jersey : John Wiley & Sons.

Corcy, M.-S. (2010). « Exposer l'invention. » *Musée des arts et métiers. La revue*, n° 51/52, pp. 78- 87.

Coulangeon, P. (2005). *Sociologie des pratiques culturelles*. Paris : La Découverte/ « Repères ».

Eidelman, J. (1992). « Qui fréquente les musées à Paris ? Une sociographie des publics des musées de France. » *Publics et Musées*, n° 2, pp. 19-47.

Eidelman, J., Roustan, M. et Goldstein, B. (dir.) (2007). *La place des publics. De l'usage des études et recherches dans les musées*. Paris : La Documentation française/Musées-mondes.

Ferriot, D. et Jacomy, B. (1998). « La révolution dans la muséologie des sciences – problématiques d'une rénovation. » In Schiele, B. et Koster, E. H. (dir.), *La Révolution dans la Muséologie des Sciences*. Lyon : Presses Universitaires de Lyon. pp. 22-23.

Gob, A. et Drouguet, N. (2006). *La muséologie : histoire, développements, enjeux actuels*. 2^e édition, Paris : Armand Colin.

Karpik, L. (2007). *L'économie des singularités*. Paris : Gallimard.

Le Marec, J. (2008). « Muséologie participative, évaluation, prise en compte des publics : la parole introuvable. » In Eidelman, J., Roustan, M. et Goldstein, B. (dir.) *La place des publics : de l'usage des études et recherches par les musées*. Paris : La Documentation Française, pp 251-267.

Lévy, M. et Jouyet, J.-P. (2006). *L'économie de l'immatériel : la croissance de demain*. Paris : La Documentation française.

Nelson, P. (1970). « Information and Consumer Behavior. » *Journal of Political Economy*, 78 (2), pp. 311-329.

Octobre, S. (2001). « Publics, pratiques et usages des musées. » In Tobelem, J.-M. (dir.). *Politique et musées*. Paris : L'Harmattan, pp. 341-374.

Schiele, B. et Koster, E. (1998). *La révolution de la muséologie des sciences : vers les musées du xx^e siècle*. Lyon : Presses universitaires de Lyon.

Wallace, M. (2006). *Museum Branding : How To Create And Maintain Image, Loyalty, and Support*. Oxford : Altamira Press.

ANNEXE I

Questionnaire (version française)

L'enquête a été construite à partir de plusieurs études disponibles. Tout d'abord, nous avons essayé, dans la mesure du possible, de reprendre les questions proposées dans les études précédentes afin d'avoir un périmètre d'analyse comparable. Nous nous sommes également inspirés du document « Evaluation

toolkit for museum practitioners, East of England Museum Hub »¹³.

Nous souhaitons mettre à disposition ce questionnaire afin que d'autres musées, qui souhaiteraient amorcer une étude de leurs publics, puissent s'en inspirer comme ils le souhaitent.

Questionnaire de visite

La parole est à vous ! Nous vous remercions de vos commentaires sur le musée, ses collections et ses expositions. Aidez-nous à rendre le musée encore plus accueillant pour son public !

Ces premières questions nous permettent de comprendre qui sont nos visiteurs.

J'ai visité : (merci de cocher une réponse)

- l'exposition temporaire seule
- la collection seule
- les deux

Est-ce votre première visite ? (merci de cocher une réponse)

- oui
- non

Si ce n'est pas votre première visite, à quelle(s) occasion(s) êtes-vous déjà venu(e) ?

- exposition temporaire (laquelle)
- musée (collection permanente)
- conférence
- autre (Nuit des musées, Fête de la science, Journées du patrimoine, etc.)

¹³ « Evaluation toolkit for museum practitioners, East of England Museum Hub », février 2008, https://abcofworkingwithschools.files.wordpress.com/2010/08/hub_evaluation_toolkit-ashx.pdf.

Aujourd'hui je suis venu(e) : (merci de cocher une réponse)

- seul(e)
- en famille
- en couple
- entre amis
- entre collègues
- en groupe (scolaire, étudiant, adulte)
- autre (merci de préciser)

Je suis : (merci de cocher une réponse)

- une femme
- un homme

Ma nationalité : (merci d'indiquer votre réponse ci-après)

.....

Mon lieu de résidence :

- à Paris même
- dans une autre commune de la région parisienne
- dans une autre région de France ? Département :
- dans un autre pays ? Lequel ?

Ma tranche d'âge : (merci de cocher une réponse)

- 14 ans ou moins 15-18 ans 19-25 ans 26-35 ans
- 36-45 ans 46-55 ans 56-65 ans plus de 66 ans

Ma profession : (merci d'indiquer votre réponse ci-après)

- artiste, artisan d'art, architecte, graphiste ou autre créateur
- cadre supérieur, profession libérale, chef d'entreprise, ingénieur
- employé enseignant cadre moyen, technicien
- ouvrier retraité élève, étudiant
- autre :

Pourquoi êtes-vous venu au musée ? (plusieurs choix possibles)

- j'ai un intérêt pour les métiers techniques
- pour m'informer sur les techniques et leur histoire
- le sujet de l'exposition temporaire m'intéresse
- pour voir les collections du musée
- pour passer un moment agréable
- pour montrer le musée à mes enfants
- pour participer à une activité (démonstration, atelier...)
- autre (préciser).....

Comment avez-vous connu le musée ? (plusieurs choix possibles)

- article de presse
- publicité
- bannière devant le musée
- bouche-à-oreille
- Internet (merci de préciser).....
- autre (merci de préciser).....

*Ces questions nous permettent de comprendre
ce que vous avez pensé des collections et des expositions temporaires.*

Pour vous, le musée des arts et métiers c'est : (merci de cocher trois réponses maximum)

- de la créativité
- de la connaissance
- du divertissement
- de l'enrichissement personnel
- des grands inventeurs
- centré sur les inventions françaises
- une histoire de l'invention et de l'inventivité
- autre (merci de préciser).....

Comment interagissez-vous avec l'exposition que vous avez visitée ? (merci de cocher toutes les réponses qui s'appliquent)

- je parcours juste l'exposition
- je lis également les textes qui l'accompagnent (panneaux, cartels, bornes...)
- je participe aux visites guidées gratuites
- je prends l'audio-guide (pour les collections)
- j'utilise mon smartphone pour plus d'explications
- je partage l'information sur les réseaux sociaux
- je partage l'information avec mon cercle d'amis
- autre (merci de préciser).....

Dans quelle mesure êtes-vous d'accord avec les propositions ci-après ? (merci de cocher une réponse par proposition)

	Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas
J'ai aimé l'expérience de ma visite des collections / de l'exposition					
Grâce à ma visite, j'ai appris quelque chose de nouveau					
La visite a suscité chez moi un intérêt pour les métiers actuels des filières scientifiques et techniques					
J'ai trouvé la qualité de l'accueil satisfaisante					
J'ai trouvé le café des techniques agréable					

Pensez-vous revenir au musée au cours des deux prochaines années ? (merci de cocher une réponse)

- certainement
 probablement
 probablement pas
 certainement pas

Quelles évolutions recommanderiez-vous au musée du CNAM ? (merci de cocher toutes les réponses qui s'appliquent)

- plus de communication autour des visites guidées gratuites
 carte d'abonnement duo (vous avez un abonnement et vous venez avec une personne de votre choix)
 expositions plus souvent renouvelées
 davantage de démonstrations de fonctionnement des objets
 supports d'information plus interactifs et complets
 autre (merci de préciser) _____

Merci de remettre ce questionnaire en fin de visite à la boutique du musée.

Le Musée des arts et métiers vous remercie d'avoir pris le temps de répondre à ce questionnaire.

Si vous souhaitez recevoir toutes les nouvelles du musée, abonnez-vous gratuitement à la lettre électronique d'information sur le site web du musée.

ANNEXE II

Analyse de la distribution et retour enquête

	DISTRIBUTION MATIN	DISTRIBUTION APRÈS-MIDI	RETOURS
24 décembre	15	15	19
26 décembre	15	19	16
27 décembre	15	15	13
28 décembre	15	15	10
29 décembre	15	0	9
31 décembre	15	0	6
2 janvier	15	0	9
3 janvier	15	0	3
4 janvier	15	0	6
5 janvier	0	0	0
21 janvier	15	15	14
22 janvier	15	15	3
23 janvier	15	15	4
24 janvier	15	15	15
25 janvier	15	15	10
26 janvier	15	15	10
28 janvier	15	15	16
29 janvier	15	15	21
30 janvier	15	15	4
31 janvier	15	15	6
1 ^{er} février	15	15	13
2 février	15	15	17
25 février	15	15	16
26 février	15	10	11
27 février	15	15	17
28 février	15	15	9
1 ^{er} mars	15	15	13
2 mars	15	15	0
4 mars	0	15	7
5 mars	15	15	6
6 mars	15	15	4
7 mars	15	15	15
8 mars	15	15	3
9 mars	15	15	20
TOTAL		899	345

La mission nationale Patrimoine scientifique et technique contemporain au muséum Henri-Lecoq (PATSTEC Auvergne)

Nathalie Vidal, Amandine Schmaltz, Mickaël Le Bras
Ville de Clermont-Ferrand, Muséum Henri-Lecoq, PATSTEC Auvergne.

Stéphane Nicolas, Aurélia Léchelon
Service Patrimoine, Manufacture Michelin.

Catherine Cuenca
Mission nationale PATSTEC, Cnam-Musée des arts et métiers, Université de Nantes.

Préambule : la mission PATSTEC

En 2003, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a confié au musée du Conservatoire des arts et métiers, une mission nationale de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique, matériel et immatériel, des soixante dernières années. En effet, le matériel des laboratoires de la recherche publique et privée est foisonnant avec l'accélération de l'évolution des sciences et des technologies, en particulier après la seconde guerre mondiale, mais malheureusement pas ou peu sauvegardé, à l'exception de quelques initiatives localisées.

De même, les professionnels du patrimoine ne s'intéressent pas encore à ces

objets issus des travaux de la recherche publique ou privée de cette période. Ce manque d'intérêt pour les objets de la science peut s'expliquer de plusieurs façons ; parmi celles-ci, on peut en citer deux : le nombre important d'instruments créés et/ou utilisés dans les laboratoires au cours des soixante dernières années implique une sélection avant que ces instruments soient patrimonialisés. Mais les critères de sélection dans les années 1995-2000 dans ce domaine peu étudié ne sont pas encore établis. L'autre point est que ces instruments scientifiques sont le plus souvent sans attrait esthétique et ressemblent à des « boîtes noires ». Ils sont difficiles à comprendre et à mettre en valeur pour les non-initiés. Ces instruments et savoirs sont considérés comme trop récents pour avoir un intérêt par les

mondes scientifique et industriel qui les mettent au rebut ou les désossent.

Vers 1960, l'expansion des sciences et des technologies favorise le développement des laboratoires, des recherches et enseignements. Mais le départ massif de ces scientifiques et de leurs équipes qui s'opère depuis une dizaine d'années dans les laboratoires, risque de faire disparaître tout un pan de la recherche contemporaine, sans laisser de traces matérielles, ni de témoignages à transmettre aux jeunes générations. Tout cela incite à se poser de nombreuses questions sur les savoirs à conserver, les domaines scientifiques qui peuvent être considérés comme majeurs, les instruments à conserver et combien pour refléter ce dynamisme de la recherche contemporaine des ^{xx}^e et ^{xxi}^e siècles.

La mission nationale est donc aujourd'hui un programme de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain, intitulé également PATSTEC, du nom de son site Web – www.patstec.fr – et s'est développée à l'échelle nationale (Ballé, Cuenca et Thoulouze, 2010). Un des objectifs principaux a été de créer un réseau regroupant différents partenaires et s'appuyant sur des chefs de projets désignés par chaque institution porteuse de la mission régionale. Ce réseau participe à un inventaire national commun qui nécessite de repérer, sauvegarder, documenter et numériser les objets pour mieux les mettre en valeur à destination d'un large public. Cette médiation est

proposée par le biais de supports tels que des expositions, des animations, des formations, des conférences, aussi bien en physique qu'en numérique. Le nombre de partenaires régionaux est aujourd'hui de dix-huit auxquels s'ajoutent des membres au niveau national comme Météo-France, le CNRS, le CEA, le CERN ou encore des industriels tels que Michelin et Essilor.

Les missions régionales comportent des comités de pilotage et scientifique engagés dans toutes les actions de sauvegarde, d'inventaire et de mise en valeur où l'on retrouve des scientifiques des composantes universitaires, des organismes de recherche et grandes écoles, mais aussi des acteurs locaux de la culture (musées, CCSTI, bibliothèques, archives, associations) avec l'appui des DRRT, DRAC et des collectivités territoriales. Dans certaines régions, ces actions peuvent aller jusqu'à la création de départements, antennes ou musées scientifiques et techniques. Un séminaire de recherche rassemble depuis 2012 une communauté de personnes intéressées par le domaine du patrimoine scientifique et technique contemporain.

Depuis quelques années, sous l'impulsion des directeurs successifs au Musée des arts et métiers, cette action de sauvegarde a pris une dimension internationale par des rencontres régulières avec les responsables européens des musées des sciences et techniques¹. Un réseau

¹ Directeurs engagés dans la mission nationale

européen intitulé ESTHER – European Scientific and Technical Heritage – a été créé et animé par le Musée en collaboration avec les institutions scientifiques et techniques de Milan, Munich, Londres, Leyden, Liège et des responsables de musées américains de Boston (MIT) et Ottawa (Musée des sciences et de la technologie du Canada). Cette internationalisation s'effectue également au sein des réseaux préexistants d'experts tels qu'Artefact (Academic conference of scientific museums), SIC (Symposium International Commission), UMAC (University Museums and Collections) et Universeum (European Academic Heritage Network).

C'est dans cette démarche que la mission PATSTEC Auvergne s'inscrit depuis dix ans et décrit dans cet article les actions et particularités de son travail de recensement et de conservation de ce patrimoine.

Introduction

Depuis 2005, la ville de Clermont-Ferrand porte la mission de sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain (PATSTEC) pour la région Auvergne, mission confiée au muséum Henri-Lecoq et plus spécifiquement au département Histoire des sciences et

techniques. Depuis cette date, la mission PATSTEC Auvergne explore les laboratoires de recherche des universités Blaise-Pascal et d'Auvergne, des centres de recherche et des entreprises (Michelin) en privilégiant des thématiques fortes au niveau local. Ces recherches thématiques permettent également d'enrichir les collections du muséum Henri-Lecoq, en constituant des fonds de scientifiques locaux dans la ligne directrice du Projet scientifique et culturel (PSC)². Des actions de valorisation sont menées ainsi qu'une collecte de patrimoine immatériel en lien direct avec des instruments inventoriés et conservés au sein des structures ou des collections du muséum.

Depuis 2008, un partenariat s'est instauré entre la ville de Clermont-Ferrand et la Manufacture française des pneumatiques Michelin. Plusieurs missions d'inventaire ont été réalisées au sein des réserves; une salle est entièrement consacrée au patrimoine scientifique et technique de l'entreprise, et des campagnes régulières de sensibilisation et de collectes ainsi que des actions de valorisation sont également menées par le Service Patrimoine de la Manufacture Michelin dans le cadre de la mission PATSTEC Auvergne.

PATSTEC : Daniel Thoulouze (2001-2007), Serge Chambaud (2007-2015) et aujourd'hui Yves Winkin (avril 2015).

² Le Projet scientifique et culturel est un document de cadrage qui définit les grandes orientations et les stratégies du musée et permet de conduire une politique d'enrichissement, de valorisation et de médiation. Ce document doit aider à une réflexion qui doit dégager une dynamique d'ensemble et déboucher sur des propositions concrètes d'action (Muséofiche, méthodologie, le Projet scientifique et culturel, Direction des musées de France, 2007).

La mission PATSTEC Auvergne

Historique et moyens

Le muséum Henri-Lecoq est le seul musée de sciences généraliste du Massif central. Il bénéficie du label « Musée de France » et présente une grande richesse de collections zoologiques, botaniques, géologiques, techniques et graphiques. Depuis 2005, de nouvelles collections scientifiques et techniques sont venues compléter cette grande diversité aboutissant à la création d'un nouveau département au muséum consacré à l'histoire des sciences et techniques. C'est également à cette date que la ville est devenue partenaire de la mission PATSTEC confiée au muséum Henri-Lecoq. À cet effet, un budget lui est attribué par la mission nationale qui bénéficie du soutien financier du ministère de la Recherche pour ce programme et pour la mise en œuvre de l'inventaire dans l'ensemble de la région Auvergne. Cette subvention permet d'embaucher, depuis le début de la mission, un équivalent temps plein (ETP). Cet ETP correspond au travail d'une attachée de conservation du patrimoine pour 3/4 de son temps et d'une assistante de conservation du patrimoine pour 1/4 de son temps, avec le soutien financier complémentaire de la ville de Clermont-Ferrand. Ceci a permis de lancer le repérage et l'inventaire au sein des universités, des centres de recherche et des entreprises situés sur Clermont-Ferrand et ses environs, grâce

à une large prospection dans le département du Puy-de-Dôme.

Afin de remplir ses engagements pour la mission nationale et couvrir l'ensemble de la région Auvergne, la ville de Clermont-Ferrand a bénéficié de subventions Feder. Ces subventions ont permis d'initier l'inventaire dans les départements de l'Allier, du Cantal et de la Haute-Loire. Pour l'Allier et le Cantal, des contractuels (assistant de conservation du patrimoine à temps plein) ont été recrutés au sein du muséum Henri-Lecoq sur une durée de 2,5 ans. Pour la Haute-Loire, l'éloignement et la possibilité de travailler avec le musée Crozatier de la ville du Puy-en-Velay nous ont fait choisir un prestataire de services, physicien de formation formé aux inventaires et connaissant le milieu des musées, rémunéré par le muséum.

À cela s'ajoutent, chaque année, de nombreux étudiants qui participent à l'inventaire et à la promotion de la mission PATSTEC. Depuis 2007, le département Histoire des sciences et techniques accueille des étudiants dans le cadre d'une UE libre, « Découverte des missions d'un muséum », mise en place en partenariat avec l'université Blaise-Pascal. Les étudiants y sont tout d'abord sensibilisés à la notion de patrimoine (sauvegarde, conservation, valorisation) par la présentation des différentes collections du muséum, conservées en réserve ou présentées au public. Ils sont ensuite formés à l'inventaire PATSTEC avec l'idée qu'ils travaillent cette fois

sur un patrimoine en construction lié à des savoir-faire et des pratiques spécifiques notamment au sein des différents laboratoires des universités. Actuellement, un étudiant réalise l'inventaire du Laboratoire magmas et volcans de l'université Blaise-Pascal. Du matériel a été stocké régulièrement dans des armoires. La première étape consiste à inventorier l'ensemble de ce matériel en collaboration étroite avec le chercheur qui s'est occupé de cette sauvegarde. Cette étape permet de recueillir une mine d'informations sur les instruments en question. Elle permet également à l'étudiant de prendre conscience de l'importance de conserver ce matériel grâce au discours du chercheur. L'instrument n'est pas simplement un objet pour l'étudiant, il est aussi associé à une histoire replacée dans le contexte du laboratoire. De plus, ce laboratoire déménage prochainement : la préparation de cet inventaire va permettre une véritable réflexion de sauvegarde pour les responsables et les chercheurs. Une communication en interne a été menée afin que chacun puisse prendre connaissance de l'inventaire en cours et également transmettre des informations relatives à d'autres instruments qu'ils jugent nécessaire de conserver. L'étudiant fait alors ici le lien entre chercheur et instrument à sauvegarder : il a joué un véritable rôle de sensibilisateur conjugué à son travail d'inventaire. Les étudiants qui ont suivi cette UE libre ont tous un nouveau regard sur les instruments qu'ils utilisent notamment en travaux pratiques et dirigés et n'hésitent pas à parler de la mission PATSTEC à

leurs enseignants. Ce sont de véritables ambassadeurs dévoués à la cause de ce patrimoine en devenir. La formation de ces étudiants permet également la constitution d'un vivier de compétences. Les heures effectuées durant les UE libre ne sont généralement pas suffisantes pour mener à bien un inventaire complet. C'est le cas pour le Laboratoire magmas et volcans. L'inventaire va donc reprendre très prochainement sous la forme d'une vacation rémunérée par la ville de Clermont-Ferrand. Le stage ouvre ainsi sur une première expérience professionnelle.

Des étudiants en master (matériaux du patrimoine) et en licence (patrimoine culturel) ont également participé à l'inventaire PATSTEC pour la région Auvergne.

L'inventaire

L'inventaire se déroule en plusieurs étapes. La première consiste à contacter les responsables de laboratoire afin de leur présenter la mission PATSTEC nationale et régionale. Suite à cet entretien, un premier repérage permet d'estimer le travail d'inventaire et de prendre contact avec les personnes-ressources qui connaissent l'histoire des appareils, leur utilisateur et les placards où sont rangées les « pépites ». Comme l'ont souligné les sociologues des sciences, il s'agit d'accorder une attention accrue à la construction de la science en partant, dans le cas de la mission patrimoniale,

des instruments, mais aussi en mettant en valeur tout ce qui lie l'instrument au chercheur, au laboratoire, à la discipline, au contexte social et économique. Cette première étape est toujours très riche car elle permet d'une part de rencontrer les acteurs de la recherche d'aujourd'hui et le matériel associé à leur recherche mais également de découvrir le potentiel historique des laboratoires de recherche à travers les instruments conservés. Il y a toujours une personne, voire plusieurs, ravie de savoir qu'elle n'a pas gardé les instruments pour rien et de faire partager l'histoire de l'instrument, de la personne qui l'a utilisé, du laboratoire et de la recherche associée. La première réaction est liée au mot « contemporain ». Lorsqu'on prononce ce terme, la surprise est totale car il est de suite associé à du matériel encore utilisé ou acheté très récemment. Faire l'inventaire de ce matériel ne présente aucun intérêt aux yeux des interlocuteurs. La présentation de la mission et l'accent mis sur l'intérêt de sauvegarder les instruments témoins de la recherche et de ses acteurs permettent de les convaincre et surtout ouvrent les portes des placards qui contiennent souvent des instruments riches de l'histoire de la recherche locale.

Une fois le matériel repéré et les personnes-ressources identifiées et contactées, l'inventaire proprement dit commence. Une fiche d'inventaire papier permet de renseigner l'instrument. Cette fiche est ensuite saisie dans une base de données numérique et une phase de recherche est réalisée afin de compléter au

mieux chaque fiche. Une campagne photographique est également réalisée sur le terrain. Ces photos, une fois retravaillées, sont insérées dans la base de données. La campagne de terrain se termine par la mise en place d'une étiquette portant le numéro d'inventaire de l'instrument ainsi que les coordonnées de la structure en charge de l'inventaire. Une fois la fiche complétée dans la base de données régionale, elle est transmise pour relecture à un conseiller scientifique. Il s'agit le plus souvent des personnes-ressources ou bien de chercheurs à la retraite contactés durant ou après la phase d'inventaire. Une fois la fiche validée par le conseiller scientifique³ celle-ci est versée dans la base de données nationales, et si elle remplit les conditions requises, apparaît sur le site Internet de la mission PATSTEC.

La prospection dans les autres départements a permis de s'intéresser à des domaines spécifiques. Dans le département du Cantal, l'inventaire de l'Unité de recherches fromagères de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) est intimement lié à la microbiologie, à l'étude fromagère et à un personnage célèbre né à Aurillac, Émile Duclaux (1840-1904), fondateur avec Louis Pasteur (1822-1895) et Émile

³ Le conseiller scientifique est souvent la personne (chercheur ou technicien) qui connaît le mieux l'instrument inventorié au sein du laboratoire et avec laquelle la fiche d'inventaire est rédigée pour la partie utilisation. Il s'agit également de professionnels du patrimoine, chargés de collections ou collecteurs éclairés.

Roux (1853-1933) de l'Institut Pasteur. Émile Duclaux conserva ses attaches cantaliennes en faisant régulièrement des séjours dans sa maison d'Olmet, située au-dessus de Vic-sur-Cère. Un buron transformé en laboratoire lui a permis de mener à bien des études sur la tomme d'Auvergne (l'autre nom du Cantal) en lien direct avec des producteurs laitiers locaux. Grâce à cet inventaire, un contact privilégié a été établi avec les descendants d'Émile Duclaux. Une rencontre a eu lieu sur place et a abouti à un don d'une partie du matériel de ce laboratoire à la ville de Clermont-Ferrand pour son muséum. Dans l'Allier, c'est le bassin industriel de Montluçon qui a été privilégié avec l'inventaire de l'IUT. Cet inventaire a permis de mettre en évidence les liens étroits avec les chercheurs de Clermont-Ferrand; mais aussi de révéler l'interdépendance régionale entre des potentiels de recherche et des potentiels économiques notamment dans le domaine de la robotique et des énergies renouvelables.

La prospection et l'inventaire dans le département de la Haute-Loire sont à ce jour terminés. Une phase importante de valorisation et de mise en place de travaux d'étudiants est en cours afin de faire connaître ce patrimoine et la mission PATSTEC. Le prestataire travaille toujours pour la mission PATSTEC Auvergne et son travail aujourd'hui est centré sur le département de physique de l'université Blaise-Pascal installé sur le campus universitaire des Cézeaux et sur la prospection dans le

domaine de l'aéronautique à Issoire. Sa prospection en Haute-Loire a notamment permis de redécouvrir un site exceptionnel: le site de Saint-Privas d'Allier, une station expérimentale d'étude de la foudre. Sa principale originalité est le déclenchement artificiel des coups de foudre par la technique « fusée-fil » afin d'en étudier les effets sur des équipements. Différents organismes (EDF, CEA, OPGC, Orange...) ont pu tester les effets de la foudre sur des équipements électriques spécifiques. Le travail d'inventaire a permis de retrouver de nombreuses personnes ayant travaillé sur ce site et ayant conservé des archives matérielles (déroulement d'expériences, fusées) et immatérielles (films, témoignages oraux). L'ensemble permettra ainsi un travail de recherches historiques sur un site unique au monde mais sur le point de disparaître.

La base de données régionale

Le service informatique de la ville de Clermont-Ferrand a développé en interne une application permettant la saisie des fiches d'inventaire et la constitution de la base de données pour la région Auvergne. La fiche d'inventaire informatisée se cale sur le modèle de la fiche d'inventaire nationale. Elle respecte l'ensemble des champs à remplir et en possède quelques-uns spécifiques à la base de données Auvergne. Les avantages de cette application sont nombreux. Il suffit d'une connexion

Internet pour se connecter à la base de données et saisir des fiches d'inventaire. Il est ainsi possible de travailler en même temps à plusieurs et dans différents lieux. Un autre avantage non négligeable est la sauvegarde assurée par le réseau de la Ville, le suivi et le dépannage rapide grâce à la direction des systèmes d'information et des télécommunications (DSIT) de la ville de Clermont-Ferrand. Trois niveaux d'accès sont prévus afin de sécuriser la base de données. Le mode lecteur permet de consulter la base sans apporter de modification, le mode rédacteur assure la saisie et la correction des fiches ainsi que l'insertion des photos au nombre de six. Le dernier mode, le mode administrateur, peut supprimer des fiches, générer les exports XML pour le transfert dans la base de données nationale et l'ajout de noms de domaines, sous-domaines, mots-clés et matériaux assurant ainsi une homogénéisation de saisie pour les menus déroulants.

Aujourd'hui, la base de données compte plus de 8800 fiches et près de 45000 photos et continue à s'enrichir grâce à de nouvelles prospections. Les fiches sont regroupées par thématique et également par structure inventoriée. Les thématiques abordées sont diverses mais se regroupent autour des spécificités retenues pour l'inventaire régional : l'ophtalmologie, la gynécologie, la galénique, la protistologie, la géologie, le pôle animal-végétal (agronomie), les machines à calculer mécaniques, l'eau, la microbiologie, la mécanique et dernièrement la microscopie, et s'intéressent à l'ensemble

des pôles de recherche et d'excellence aussi bien dans les établissements publics que privés. Ces laboratoires ont une position de leader dans leur domaine et reçoivent des financements spécifiques – par exemple, le Laboratoire magmas et volcans, porté par un Idex, « Initiative d'Excellence ». Dans ce contexte, la politique d'excellence scientifique a aujourd'hui une influence sur la sélection patrimoniale, et en particulier sur le matériel trouvé lors des inventaires, dessinant des cadres spécifiques de collecte liés à l'économie locale des laboratoires de recherche.

L'application permet d'éditer des catalogues pouvant regrouper une thématique, un inventaire complet dans une structure ou une seule fiche d'inventaire en renseignant le numéro d'inventaire. Deux types de catalogues sont proposés. Le premier reprend l'intégralité des champs de la fiche d'inventaire avec une photographie ; cette version est utilisée pour la relecture par les conseillers scientifiques. Le second catalogue sélectionne un nombre plus restreint de rubriques (titre, numéro d'inventaire, encombrement, organisme, laboratoire) ainsi qu'une photo de l'instrument en question permettant une lecture rapide de l'inventaire. Cette version allégée est très utile pour les structures inventoriées afin de garder trace de l'inventaire et de leur patrimoine scientifique et technique ancien, actuel et futur. La base possède également une rubrique champ libre qui permet de faire des recherches par mots-clés dans l'ensemble de la base.

La question délicate de la sauvegarde et de la conservation

Le numéro d'inventaire attribué à chaque instrument est très précieux dans l'étape de la sauvegarde. Lorsqu'un instrument inventorié doit être enlevé, la structure nous contacte pour nous demander si nous souhaitons récupérer l'instrument en question. Grâce au numéro d'inventaire, l'instrument est très rapidement identifié dans la base de données. La fiche nous renseigne sur la thématique dans laquelle il s'inscrit et sur son encombrement, un paramètre très contraignant dans la démarche de sauvegarde. Dans un premier temps, nous essayons de convaincre la structure de garder l'instrument, témoin de son histoire, ou au moins de le stocker dans la perspective de pouvoir le déposer dans une réserve appropriée. Malheureusement, la plupart du temps, les instruments ne peuvent être conservés pour des raisons de place. La deuxième étape consiste à aller voir l'instrument sur place pour juger de l'état de celui-ci. Entre le moment où il a été inventorié et celui où la structure souhaite s'en séparer, il a pu se passer un certain temps et/ou l'instrument a pu subir des dégradations comme, par exemple, l'emploi de pièces pour réparer un autre instrument de même nature (cannibalisme technique) ou servir dans le montage d'une manipulation (recyclage technique). L'histoire de l'instrument est également prise en compte car certains instruments gardent tout leur intérêt même cannibalisés. Lorsque l'instrument est très détérioré et n'a qu'un intérêt moindre sur le plan his-

torique pour la structure et la recherche locale, il est conseillé de ne pas le garder.

Si l'instrument ne peut être conservé par la structure, une première réflexion est menée au sein du muséum Henri-Lecoq par rapport à son PSC afin de juger de la pertinence de le faire rentrer dans les collections du muséum avec comme objectif de le présenter en commission d'acquisition pour qu'il acquiert le statut Musée de France. Si le musée ne peut conserver l'instrument, le réseau PATSTEC est sollicité. Ce réseau permet d'échanger et de mutualiser les expériences. Il permet également de solliciter chaque partenaire dans la démarche de sauvegarde au niveau national des instruments inventoriés. L'objectif premier de la mission PATSTEC est de sauvegarder le patrimoine scientifique et technique contemporain des 70 dernières années mais le but n'est pas non plus de garder en plusieurs exemplaires un même instrument, même si celui-ci n'a pas la même histoire dans chaque laboratoire, dans chaque région. L'important est avant tout d'en préserver un exemplaire au niveau national qui pourra être présenté avec l'histoire appropriée – c'est-à-dire dans le cadre de la valorisation choisie à un moment donné (spécifique au laboratoire, replacée dans une histoire plus générale de la discipline par exemple). Ceci n'empêche pas que chaque région puisse conserver le même instrument à son niveau. Au sein des universités, il est possible d'établir une politique de sauvegarde, de conservation et de valorisation en fonction de l'histoire de la structure, des thématiques abordées et des

découvertes réalisées mais il faut prendre en compte le même problème que pour le muséum, pouvoir stocker ce matériel. Un projet de lieu de stockage ou lieu de réserve mutualisé entre les deux universités est en cours de réflexion et permettrait de répondre à plusieurs attentes :

- réceptionner le matériel dont les laboratoires veulent se séparer,
- trier ce matériel de façon raisonnée et garder ce qui illustre la recherche et l'histoire des universités clermontoises, ou ayant un intérêt muséographique,
- rédiger une politique d'acquisition répondant au projet de diffusion de la culture scientifique développée par la Communauté d'universités et d'établissements (COMUE Clermont Université),
- conserver, inventorier le matériel et constituer ainsi une collection de référence,
- valoriser sous forme d'expositions ce matériel en lien avec les autres collections des universités (zoologie, botanique, géologie, santé...),
- constituer un fonds documentaire sur la recherche en lien avec ces instruments et les chercheurs (archives, entretiens écrits et filmés...).

Jusqu'à ce jour, nous n'avons toujours pas trouvé de lieux de stockage ni pour l'université Blaise-Pascal, ni pour l'université d'Auvergne. La réunification des deux universités et l'inscription dans leur charte de la diffusion de la culture scientifique sont un espoir dans la prise

en compte de leur patrimoine, qui deviendrait commun, et de la valorisation de celui-ci.

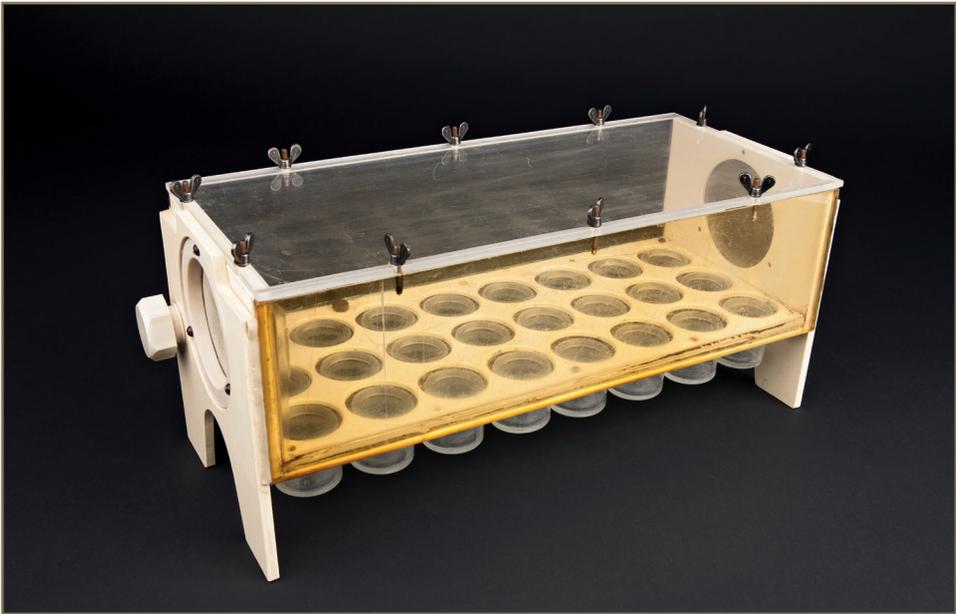
Le problème ne se pose pas dans les mêmes termes pour d'autres structures comme les centres de recherche (par exemple l'INRA) qui essayent au maximum de conserver ce matériel ancien et patrimonial, ou les entreprises (comme Michelin) qui sont sensibles à leur histoire et qui ont la volonté de garder de nombreux témoins de celle-ci.

La constitution de fonds de scientifiques locaux

Au niveau du muséum, la sauvegarde de plusieurs instruments issus de la mission PATSTEC a néanmoins pu être réalisée dans le cadre de la constitution de fonds de scientifiques locaux. C'est le cas pour le matériel d'expérimentation d'Émile Duclaux. Mais il en est de même pour certains instruments beaucoup plus contemporains comme une cage à population et une étireuse de micro-aiguilles ayant appartenu au professeur Philippe L'Héritier (1906-1994), célèbre généticien français. Suite à l'inventaire du Laboratoire de génétique de l'Université Blaise-Pascal, nous avons été contactés par la collaboratrice du professeur L'Héritier afin de voir les modalités possibles de conservation de ces deux instruments. La cage à population (ou démomètre) a été mise au point par les professeurs L'Héritier et Teissier dans les années 1930. Le démomètre

permet d'étudier des générations mélangées comme dans la nature. Au début de l'expérimentation, quelques centaines d'individus adultes sont introduits dans la cage à population. À 20 °C, le cycle de développement des drosophiles (larves, pupes, adultes) dure entre 15 et 20 jours, ce qui correspond au temps de renouvellement des godets. Des milliers d'œufs sont pondus, ce qui provoque une sélection larvaire très intense. Seuls les génotypes les mieux adaptés aux conditions de la cage survivent. On peut analyser l'effet de la sélection en procédant de la façon suivante : d'une part, on mesure la fréquence de l'allèle étudié dans l'échantillon d'adultes (prélevé comme indiqué

ci-dessus) développés dans la cage, en présence d'une intense sélection larvaire, d'autre part, on prélève un échantillon d'œufs en plaçant un godet de nourriture fraîche pendant quelques heures dans la cage. Les œufs sont ensuite placés sur une grande quantité de nourriture et se développent donc sans sélection larvaire. On mesure la fréquence de l'allèle chez les adultes qui en sont issus. Les premières cages à population ont été fabriquées de manière artisanale par le professeur L'Héritier et n'ont jamais fait l'objet d'un brevet. Elles étaient en bois et en verre et très difficiles à nettoyer. L'exemplaire conservé aujourd'hui au muséum Henri-Lecoq (photo 1) a été fa-



Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / Adeline Girard

Photo 1

Cage à population

briqué par une entreprise à partir de plans fournis par le laboratoire de génétique de Clermont-Ferrand fondé par le professeur L'Héritier dans les années 1970. L'étireuse de micro-aiguilles a été fabriquée par le professeur L'Héritier au laboratoire de Clermont-Ferrand. Elle permet de réaliser des pointes de verre extrêmement fines utilisées pour l'injection de virus dans les drosophiles. Ces deux instruments ont reçu un avis favorable de la commission d'acquisition et sont les deux pièces majeures du fonds L'Héritier. Ce fonds s'est enrichi de documents (thèse, articles, papiers manuscrits, album photographique de sa carrière) à la suite d'une rencontre avec ses descendants.

Suite à l'inventaire du laboratoire de biophysique de l'université d'Auvergne et les nombreuses discussions avec son responsable, un nouveau fonds est en cours de constitution. La démarche est très différente puisqu'elle se fait du vivant du chercheur, ce qui permet de recueillir toutes les informations concernant les instruments sauvegardés mais également celles de sa carrière de chercheur. Le professeur Aïache s'est spécialisé dans la galénique (fabrication des médicaments) et particulièrement les aérosols et les systèmes de dissolution. Durant sa carrière, il a réalisé des prototypes et regroupé un grand nombre d'instruments illustrant l'évolution de cette discipline. De la documentation sur ces instruments ainsi que des ouvrages rédigés par le professeur Aïache complètent ce fonds.

La valorisation

Elle se présente sous différentes formes, notamment des expositions permanentes ou temporaires, des conférences ainsi que des ouvrages ou lors de manifestations locales (Rendez-vous du carnet de voyage, soirée Maths), nationales (Fête de la science) et européennes (Nuit européenne des musées, Journées européennes du Patrimoine).

En 2008, une exposition temporaire « Si la mesure m'était comptée... » invitait les visiteurs à voyager dans le monde de la mesure et à découvrir des instruments qui ont jalonné son histoire à travers plus de 250 objets insolites ou précieux. Plus d'une centaine d'instruments venant d'une douzaine de laboratoires de recherche illustraient la mission PATSTEC Auvergne. Un instrument de chaque région, partenaire de la mission PATSTEC, était également exposé. Le challenge fut de présenter une grande vitrine ne contenant que des instruments à la fois contemporains mais également plus anciens, plus esthétiques car en bois ou en laiton. Faire côtoyer plastiques et laiton fut une réussite car les visiteurs sont allés au-delà de l'esthétique de l'instrument et se sont surtout intéressés à sa fonction et à son lieu d'utilisation. À la demande des visiteurs, la vitrine a été complétée d'un catalogue d'instruments. Il s'agissait là de la première exposition au muséum entièrement consacrée aux sciences et techniques. S'y sont rencontrés un public d'habités, découvrant une nouvelle facette du muséum, et un nouveau

public, attiré par le caractère scientifique et technique de l'exposition dans un lieu habituellement dédié aux sciences naturelles. L'intérêt de ces publics, traduit par le souhait exprimé de pouvoir acquérir un catalogue, ou par des rencontres insolites entre visiteurs et objets⁴, a créé la surprise. Ce fut l'occasion de sensibiliser et d'attirer un nouveau public au muséum.

En 2013, le muséum Henri-Lecoq a ouvert un espace consacré à l'histoire des sciences. Un espace est dédié à l'histoire de la génétique en Auvergne et au professeur L'Héritier qui a fondé le deuxième laboratoire de génétique à la faculté des sciences de Clermont-Ferrand. Dans cette vitrine est présentée la cage à population. Elle est complétée par du matériel de préparation et de manipulation génétique des drosophiles provenant d'un don du laboratoire Réparation du génome mitochondrial normal et pathologique (RGM) de l'université Blaise-Pascal. Un deuxième espace est consacré à l'histoire de la microbiologie. Elle présente la verrerie de laboratoire d'Émile Duclaux ainsi qu'une expérience réalisée par Louis Pasteur, lors de son séjour à Clermont-Ferrand, avec Émile Duclaux. Un troisième microbiologiste, Émile Roux, va intervenir dans cette histoire locale de la microbiologie.

⁴Lors de l'inauguration, le maire de Clermont-Ferrand, Serge Godard, physicien et ancien directeur de l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, est resté en arrêt devant un fréquencesmètre (mission PATSTEC Pays de la Loire) car il avait utilisé exactement le même durant ses recherches. On pouvait ainsi imaginer toute son histoire et l'histoire du laboratoire défilier dans sa tête à ce moment précis.

Les fondateurs de l'Institut Pasteur se sont ainsi pour la première fois côtoyés tous les trois à Clermont-Ferrand. L'espace Histoire des sciences consacre également une large place à Blaise Pascal (1623-1662). Une partie traite particulièrement du Pascal physicien et une vitrine présente des instruments de mesure de la pression en lien avec la célèbre expérience du puy de Dôme. Ces instruments ont été sélectionnés grâce à la base de données régionale PATSTEC.

En 2014, la nouvelle exposition temporaire du muséum consacrée à l'infiniment petit a permis de lancer l'inventaire des microscopes et des plateformes de microscopie d'Auvergne. L'exposition présente un diaporama illustrant le domaine des microscopes et leur fonctionnalité thématique en Auvergne mais également dans toute la France à travers les partenaires de la mission et le réseau PATSTEC. Elle est complétée par un catalogue sur la microscopie en Auvergne. Décliné en trois parties (plateformes et microscopes, portfolio, portraits de microscopistes), l'ouvrage présente la grande richesse régionale dans le domaine de la microscopie et la synergie qui anime le réseau des microscopistes clermontois à travers des laboratoires des deux universités, des centres de recherches (INRA, INSERM, CNRS) et des entreprises locales (Michelin, Constellium, Aubert et Duval).

Dans le cadre des 10 ans de la mission PATSTEC, une exposition réalisée à la Bibliothèque des sciences de l'université

Blaise-Pascal a permis de présenter le potentiel patrimonial des deux universités. Cinq instruments de chaque université ont été mis en scène, ceci étant complété par une interview d'un chercheur autour de cet instrument. Cette exposition a permis de révéler des instruments exceptionnellement riches sur le plan de la recherche et de son histoire locale. Ainsi, un four d'envol (photo 2) a été présenté au public. Il s'agit d'une expérience mise au point par les deux universités clermontoises sous forme de deux prototypes d'un four de croissance cristalline dans les années

1970. Un exemplaire a été embarqué sur la navette américaine, l'autre est resté au sol et a fonctionné en même temps afin de pouvoir comparer les résultats. Une chambre à fils à dérive utilisée aux ISR (anneaux de stockage à intersection) du CERN (Organisme européen pour la recherche nucléaire) et provenant du Laboratoire de physique corpusculaire de l'université Blaise-Pascal a également refait surface pour l'occasion. Elle a été équipée d'un socle et d'un éclairage par le laboratoire afin de pouvoir être présentée au public.



Photo 2
Four d'envol

Frédéric Chausse

Michelin : partenaire de la mission PATSTEC

Depuis toujours, l'entreprise Michelin est très attentive à la préservation de son histoire et à la conservation de son patrimoine. Depuis 2009, l'Aventure Michelin, site culturel du groupe prenant la forme d'un musée, a ouvert ses portes afin de présenter au public ce riche patrimoine d'envergure locale, nationale et internationale. Annexé à cet espace muséal, le service Patrimoine de la manufacture Michelin conserve et enrichit les collections. Plusieurs réserves parfaitement adaptées à la conservation accueillent les témoins de l'histoire de l'entreprise. Une salle en particulier est dédiée au patrimoine scientifique et technique. Soucieux de préserver son patrimoine scientifique et technique et de mieux le connaître, Michelin a rejoint la mission PATSTEC. Depuis 2009, une convention lie la ville de Clermont-Ferrand et la Manufacture afin que le muséum Henri-Lecoq réalise, en étroite collaboration avec le service Patrimoine, l'inventaire des instruments scientifiques et techniques.

Les actions de sauvegarde s'inscrivent dans la volonté de Michelin de conserver des traces de son passé. Les valeurs et messages défendus par Michelin aujourd'hui trouvent leurs racines dans son histoire, dont les éléments tangibles sont collectés, conservés et valorisés dans le cadre de la mission patrimoniale. L'enjeu est donc double :

conserver le matériel historique et lui donner du sens en l'inscrivant dans une continuité. L'objectif ultime est de valoriser ce patrimoine au titre de la communication du groupe, puisque les activités patrimoniales sont rattachées au département Image. Loin de rester enfermé dans les réserves, ce patrimoine a vocation à être exposé.

L'intérêt de ce patrimoine est donc multiple :

- une inscription dans l'histoire des sciences et des techniques, notamment en montrant comment Michelin s'équipe volontairement, et depuis sa genèse, en matériel de pointe pour ses activités de recherche ;
- une stratégie de communication : le rôle du patrimoine historique est de prouver et légitimer ce qui est défendu par Michelin depuis toujours ;
- un soutien au tourisme industriel régional : la volonté de valorisation du patrimoine a conduit à la création de l'Aventure Michelin, devenue un élément important de l'offre touristique régionale. De nouvelles pièces, ou la valorisation des pièces existantes (MET), ne peuvent qu'être bénéfiques à cette activité.

Les missions d'inventaire

Les missions d'inventaire se déroulent au sein des réserves sur des périodes de 15 jours en moyenne. Depuis la première mission en 2009, une dizaine

a suivi. La première a permis de trier par catégorie les instruments entreposés et notamment toute la partie des instruments de mesure et d'observation qui représente la part la plus importante de l'inventaire. D'autres thématiques sont également présentes mais étaient déjà triées (bureautique comprenant les machines à calculer, matériel médical, matériel cinématographique, matériel photographique, horloges).

L'inventaire sur place consiste tout d'abord à attribuer un numéro d'inventaire à chaque instrument. Les numéros d'inventaire ont été calés par rapport aux critères de classement du service Patrimoine de Michelin: OBJ pour OBJet, suivi d'un nombre correspondant à la catégorie inventoriée (par exemple, 28 pour les instruments de mesure et d'observation), puis d'un nombre qui s'incrémente au fur et à mesure de l'inventaire. Une fiche de terrain papier est remplie et reprend entre autres le numéro d'inventaire ainsi que le titre de l'instrument, les inscriptions portées sur l'instrument (notamment les immatriculations Michelin), sa description, son utilisation, ses caractéristiques, les matériaux constitutifs, l'état, l'encombrement ainsi que toute information transmise par le Service Patrimoine. Une campagne photographique est réalisée (prise de cinq photos au minimum). L'inventaire sur place se termine par la mise en place d'une étiquette verte de repérage portant le numéro d'inventaire d'un côté et les coordonnées de l'organisme responsable de l'inventaire, le muséum Henri-Lecoq

de l'autre côté. Les fiches sont ensuite saisies dans la base de données régionale.

Chaque mission fait ensuite l'objet d'un bilan remis à l'entreprise Michelin et conservé dans les archives du département Histoire des sciences et techniques au muséum. Ce bilan permet de noter les actions menées durant les missions d'inventaire, le nombre de fiches réalisées et les instruments remarquables inventoriés. Il permet également d'apporter une réflexion sur l'inventaire et de lier notamment ces instruments à des parcours d'hommes.

Les résultats

• La métrologie

Une thématique Michelin a été créée dans la base de données régionale. Elle compte 1 221 fiches saisies et plus de 6 000 photos. Cet inventaire a permis de mettre en évidence des thèmes très forts au sein de l'entreprise et notamment l'importance de la métrologie et de l'analyse avec la catégorie OBJ28 (instruments de mesure et d'observation) qui regroupe 544 fiches. Dans cette catégorie, des regroupements d'instruments font ressortir les thématiques suivantes :

- peser avec précision: balance, balance de précisions, balance à bain d'huile, amortisseur Lhomargy, trébuchet, dynamomètre ;
- caractériser la nature des composants du pneumatique: colorimètre,

- réfractomètre, ixomètre de Barbey, durimètre, densimètre, tensiomètre, tachymètre, pied à coulisse, vis micrométrique, endoscope, chambre à aïromètre, dilatomètre, scléroscope, permascope ;
- paramètres climatiques ambiants dans les ateliers : hygrothermomètre, thermomètre, baromètre, anémomètre, psychromètre ;
 - mesure des surfaces (cartographie) : planimètre polaire, planimètre compensateur avec notice, théodolite ;
 - chaleur et cuisson pour la vulcanisation : pyromètre ;
 - microscopie : microscope, microscope inversé, loupe binoculaire, microscope électronique à balayage, microscope électronique en transmission, métalliseur ;
 - mesure des courants électriques : fréquencemètre, voltmètre, ampèremètre, wattmètre, ohmmètre, galvanomètre, multimètre.

Le cas du Microscope électronique en transmission CSF (photo 3)

En juillet 1947, la Manufacture française des pneumatiques Michelin est la première entreprise industrielle française à s'équiper d'un Microscope électronique en transmission (MET) de marque CSF (Compagnie générale de télégraphie sans-fil) type MIV. C'est ainsi qu'aux analyses chimiques vont s'ajouter des analyses physiques de grande précision pour le contrôle des matières premières. Un des composants analysé fut le noir de carbone utilisé

pour renforcer la gomme. Grâce au microscope électronique et à la prise de plus de 5 000 clichés, l'entreprise a pu répondre aux problèmes de qualité rencontrés sur ce matériau. L'analyse des graphes a permis de mettre en évidence une variation de 10 angströms pour la taille des particules entraînant une dégradation de la gomme. Le gain de qualité entre 1951 et 1952 a également permis d'améliorer les performances du pneu « Radial ». Installé dans une salle avec un système anti-vibratoire, le CSF a été réformé vers 1961 et remplacé par un MET plus performant, lui-même remplacé et complété par d'autres équipements de microscopie de plus en plus sophistiqués jusqu'à aujourd'hui, plaçant la recherche chez Michelin toujours à la pointe de la technologie. L'histoire de ce microscope n'est pas que technique, elle est aussi humaine : Jacques Bouteville fut spécialement recruté pour travailler sur ce microscope, qui à l'époque était un prototype, et lancer la microscopie chez Michelin. Il fut le témoin des progrès de la microscopie électronique et celui qui a mis en place la microscopie en Auvergne.

• *L'analyse d'images*

La deuxième catégorie la plus importante est OBJ27 (appareils multimédias et audiovisuels). Beaucoup servent ou servaient pour la réalisation de films ou photographies promotionnels mais nombre d'entre eux ont été utilisés dans la recherche pour analyser des paramètres particuliers comme la déformation du pneu.



Michelin / Gérard Paris

Photo 3

Microscope électronique en transmission avec Jacques Bouteville

**Caméra très haute vitesse
NAC 65-048 (photo 4)**

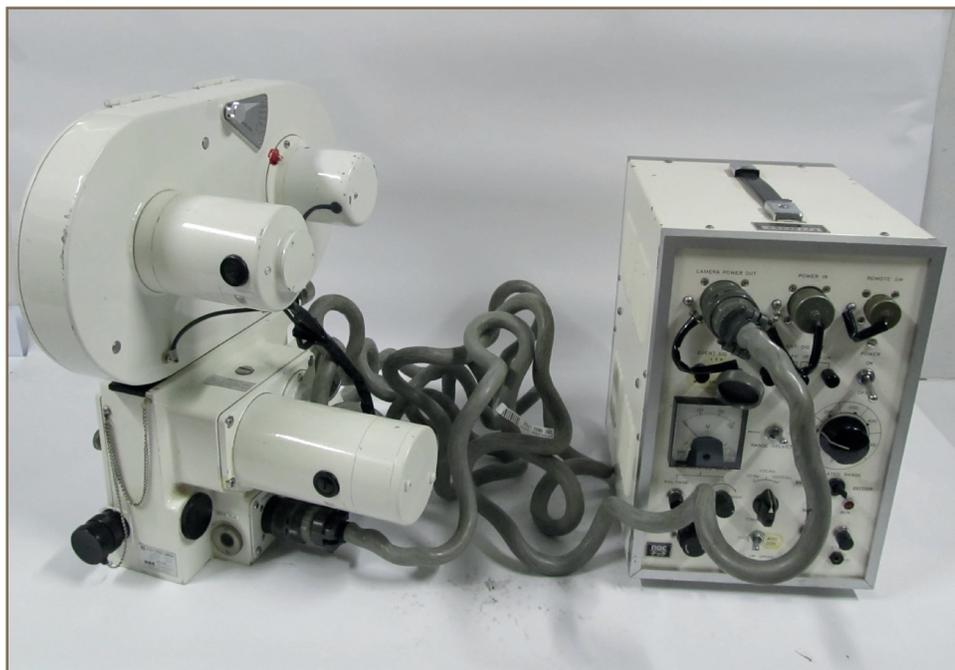
Acquise dans les années 1970 par le pôle recherche de l'entreprise, la caméra servait à la mise au point de machines de sollicitation, pour observer l'aire de contact, les trajectoires de Formule 1 sur circuit, la déformation d'éprouvettes, l'explosion de pneus ou encore étudier la cassure des fils de tréfilage. Pour l'étude de l'aire de contact et les trajectoires, la caméra était utilisée dans une fosse de mesure. Sur une piste de 1 700 m de long se trouvent une dalle de mesure d'effort

(pour la compétition) et un hublot de 30 cm x 30 cm pour les prises de vue. La voiture est lancée à plus de 300 km/h.

Actions de sensibilisation, de sauvegarde et de valorisation

- *Sensibilisation rime avec sauvegarde*

Suite aux premières missions d'inventaire, le service Patrimoine a entrepris une importante phase de sensibilisation auprès du personnel



Ville de Clermont-Ferrand / Muséum Henri-Lecoq / Amandine Schmalz

Photo 4

Caméra très haute vitesse

Michelin, ce qui a permis de sauvegarder de nombreux instruments, notamment dans le domaine de la métrologie. La sensibilisation passe par le besoin de connaître les instruments utilisés dans les ateliers et les laboratoires de recherche pour conserver la mémoire et l'histoire de l'entreprise dans le domaine des avancées technologiques. L'accent est mis sur le fait que ces objets ne sont pas seulement stockés mais qu'ils sont inventoriés et versés dans une base de données nationale dans le cadre d'une mission nationale, ce qui est un critère majeur de motivation.

La sensibilisation est très efficace puisque du matériel arrive régulièrement dans la réserve dédiée aux sciences et techniques et de nouvelles missions d'inventaire sont donc d'ores et déjà prévues. Cette sensibilisation s'accompagne d'une sauvegarde importante et naturelle.

En 2010, la sauvegarde d'un Microscope électronique en transmission a été réalisée. Désireux d'être à la pointe des innovations technologiques, Michelin s'est toujours doté des appareils les plus perfectionnés. En 1947,

c'est le premier microscope électronique en transmission qui équipe l'entreprise, puis, quelques années plus tard, le premier Microscope électronique à balayage. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, la microscopie, comme nombre de technologies, connaît un essor fulgurant. La précision et l'efficacité des appareils ne cessent de progresser d'année en année. Michelin va conforter sa position de leader dans ces technologies en s'équipant régulièrement des dernières innovations dans le domaine de la microscopie. En 1967, Michelin s'équipe d'un nouveau MET. Remplacé quelques années plus tard, celui-ci, toujours fonctionnel, n'est pas mis au rebut et grâce à Jacques Bouteville, va connaître de nouvelles vies. Il intègre la faculté de botanique où il va révolutionner la recherche dans ce domaine. Au vu des résultats, la faculté s'équipe d'un MET plus récent. Mais celui de Michelin continue son aventure au musée Crozatier de la ville du Puy-en-Velay où nombre d'animations seront réalisées. Suite à une restructuration de la salle qui l'accueille, le microscope ne peut être gardé mais toujours grâce à la volonté de Jacques Bouteville, il réintègre l'université par la porte du CUST, devenu aujourd'hui Polytech, où il sera utilisé pendant de nombreuses années par plusieurs générations d'étudiants. Jacques Bouteville en sera le gardien, veillant à son bon fonctionnement et son entretien, jusqu'à devenir le formateur des étudiants bien après sa retraite. Contactée par Polytech qui souhaitait se séparer de cet instrument volumineux ne

servant plus et ayant pris connaissance de l'histoire de ce microscope, l'entreprise Michelin a accepté de sauvegarder et de conserver ce microscope, son microscope !

- *Valorisation au sein de l'entreprise et hors les murs*

En 2009, l'entreprise a participé à la Fête de la science en présentant plusieurs instruments de métrologie dans le hall de l'Aventure Michelin inventoriés dans le cadre de la mission PATSTEC Auvergne. L'intérêt de la mission est de pouvoir identifier les instruments et d'extraire de la fiche d'inventaire les informations nécessaires à la rédaction de cartels de présentation.

En 2013, plusieurs instruments de mesure de la pression ont été retenus et sont présentés dans la vitrine de la section « Blaise Pascal physicien au muséum Henri-Lecoq ».

En 2014, dans le cadre de l'exposition temporaire du muséum Henri-Lecoq « Infiniment petit », plusieurs microscopes sont présentés dans un diaporama consacré à la mission PATSTEC.

Un projet d'inscription et de classement à la liste supplémentaire des monuments historiques est en cours pour le Microscope électronique en transmission de marque CSF. Remplacé depuis par des MET plus sophistiqués et plus puissants, il a trouvé une nouvelle jeu-

nesse au sein de l'Aventure Michelin en tant que témoin de la longue histoire de la microscopie qui marque l'entreprise mais également l'ensemble de la recherche en Auvergne.

Conclusion

Depuis 2005, la mission PATSTEC Auvergne continue de prospecter et touche de plus en plus de personnes et de structures. La particularité de la mission PATSTEC Auvergne est d'être menée par un muséum, à l'inverse de nombreuses autres régions où ce sont les universités ou des Cnam régionaux qui portent la mission. Cette originalité est une force car elle donne toute liberté de pouvoir prospecter au sein des différentes universités, centres de recherche et entreprises locales. Le statut de Musée de France permet également une sauvegarde pérenne de quelques instruments, ponctuellement, mais qui hélas ne peut prendre en compte tout le patrimoine scientifique et technique contemporain. Cependant, les compétences et l'expertise du muséum Henri-Lecoq peuvent aider ces structures à sauvegarder et valoriser leur patrimoine. C'est ainsi que la même démarche a été faite auprès de l'entreprise Michelin et de son Service Patrimoine qui ne dispose pas de personnes compétentes dans le domaine de l'inventaire du patrimoine scientifique et technique, instaurant un riche partenariat entre l'entreprise et le muséum.

Après près de 10 ans d'inventaire, la mission PATSTEC Auvergne est bien installée mais elle est loin d'avoir couvert tous les pôles de recherche de la région. Grâce aux supports de communication développés pour fêter les 10 ans de la mission (2013-2014), de nouvelles portes s'ouvrent notamment dans le secteur privé. Ceci est d'autant plus réalisable que la mission régionale est intégrée dans le réseau national PATSTEC car au-delà de la mission, il s'agit bien d'un réseau installé et actif sur l'ensemble du territoire travaillant en parfaite symbiose avec la tutelle du Cnam-Musée des arts et métiers.

Bibliographie

Ballé, C., Cuenca, C., et Thoulouze, D. (2010). *Patrimoine scientifique et technique. Un projet contemporain*. Paris : La documentation française.

Ballé, C., Cuenca, C., et Thomas, Y. (2005). *Le patrimoine scientifique et technique contemporain. Un programme de sauvegarde en Pays de la Loire*. Paris : L'Harmattan (Patrimoine et société).

Bernard, C., Del Prète, A., Garmy, E., Schmaltz, A. et Vidal, N. (2014). « Apport scientifique, éducatif et ludique de l'espace Blaise Pascal au muséum Henri-Lecoq de Clermont-Ferrand. » *La Lettre de l'Ocim*, n° 152, pp. 22-29.

Bletterie, R. (1981). *Michelin. Clermont-Ferrand, capitale du pneu 1900-1920*. Avallon : Éditions de Civry.

Cornu, M., Cuenca, C. et Fromageau, J. (2010). *Les collections scientifiques de l'outil de connaissance à l'objet de patrimoine*. Paris : L'Harmattan (Droit du patrimoine culturel et naturel).

Collectif (2008). *Instruments sur mesure*. Catalogue virtuel de l'exposition « Si la mesure m'était comptée... » (11 avril – 22 février 2009). Ville de Clermont-Ferrand/Muséum Henri-Lecoq. Consulté en mai 2015 sur l'hébergeur de publications numériques *Calameo.fr* : <http://fr.calameo.com/read/000000209494a2f3b8f17>.

Collectif (2015). *Histoire de la microscopie en Auvergne*, Clermont-Ferrand : Ville de Clermont-Ferrand/Muséum Henri-Lecoq.

Donnet, P.-A. (2008). *La saga Michelin*. Paris : Seuil.

Dumond, L. (2002). *L'épopée Bibendum, une entreprise à l'épreuve de l'histoire*. Toulouse : Privat.

Jemain, A. (1982). *Michelin. Un siècle de secrets*. Paris : Calmann-Lévy.

Lottman, H. (1998). *Michelin, 100 ans d'aventures*. Paris : Flammarion.

Mission nationale PATSTEC (2009-2014). « Nouvelles de PATSTEC », Newsletter en ligne (patstec.fr).

Rainette, C., Cornu, M. et Wallaert, C. (2008). *Guide juridique sur le patrimoine scientifique et technique*. Paris : L'Harmattan.

Cahiers d'histoire du Cnam

Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses

coordonné par Loïc Petitgirard

Dossier : Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses

Loïc Petitgirard – Introduction au dossier

Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard – « *Du Système métrique au Laboratoire d'essais : le Cnam et la Métrologie nationale (1795-1960)* »

Loïc Petitgirard – « *Le Cnam et la restructuration de la Métrologie française dans les années 1960* »

Jean Bastie et Loïc Petitgirard – « *L'aventure de la photométrie au Cnam (1970-2005)* »

Michel Lecollinet – « *Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam, depuis 1967* »

Claudine Fontanon et Loïc Petitgirard – Entretien avec André Allisy

Varia

Rebecca Amsellem – « *Qui est le public du Musée des arts et métiers ? Une analyse de la visite muséale comme bien d'expérience* »

Nathalie Vidal, Mickaël Le Bras, Amandine Schmaltz, Stéphane Nicolas, Aurélia Léchelon et Catherine Cuenca – « *La mission nationale Patrimoine scientifique et technique contemporain au muséum Henri-Lecoq (PATSTEC Auvergne)* »

● **vol. 3**

2015 / Premier semestre
(nouvelle série)