



HAL
open science

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

Michel Lecollinet

► To cite this version:

Michel Lecollinet. Les enseignements de la Chaire de métrologie du Cnam, depuis 1967. Cahiers d'histoire du Cnam, 2015, Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses, vol.03 (1), pp. 109-127. hal-03790258

HAL Id: hal-03790258

<https://cnam.hal.science/hal-03790258>

Submitted on 28 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

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 volucompteurs 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 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.
- 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)

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

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'étiolé 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.