HAL open science

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

Jean Bastie, Loic Petitgirard

To cite this version:

Jean Bastie, Loic Petitgirard. L'aventure de la photométrie au Cnam (1970-2005). Cahiers d'histoire du Cnam, 2015, Le Cnam et la Métrologie nationale depuis les Trente Glorieuses, vol.03 (1), pp. 75-107. hal-03790248

HAL Id: hal-03790248

https://cnam.hal.science/hal-03790248v1

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

Repères – Enquête d'acteur

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 IXe 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 institut[1].

Il incombe au Cnam des responsabilités en métrologie depuis le XIXe 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 IIIe, tandis que les activités d'étalonnage restaient rue Gaston-Boissier, Paris XVe. 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 spécifiques[2]. 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 préciserons 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 primaire[3]. On mettra un premier accent sur la réalisation de la candela suite à la nouvelle définition adoptée en 1979, car l'INM 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 XVIIIe 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,

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.

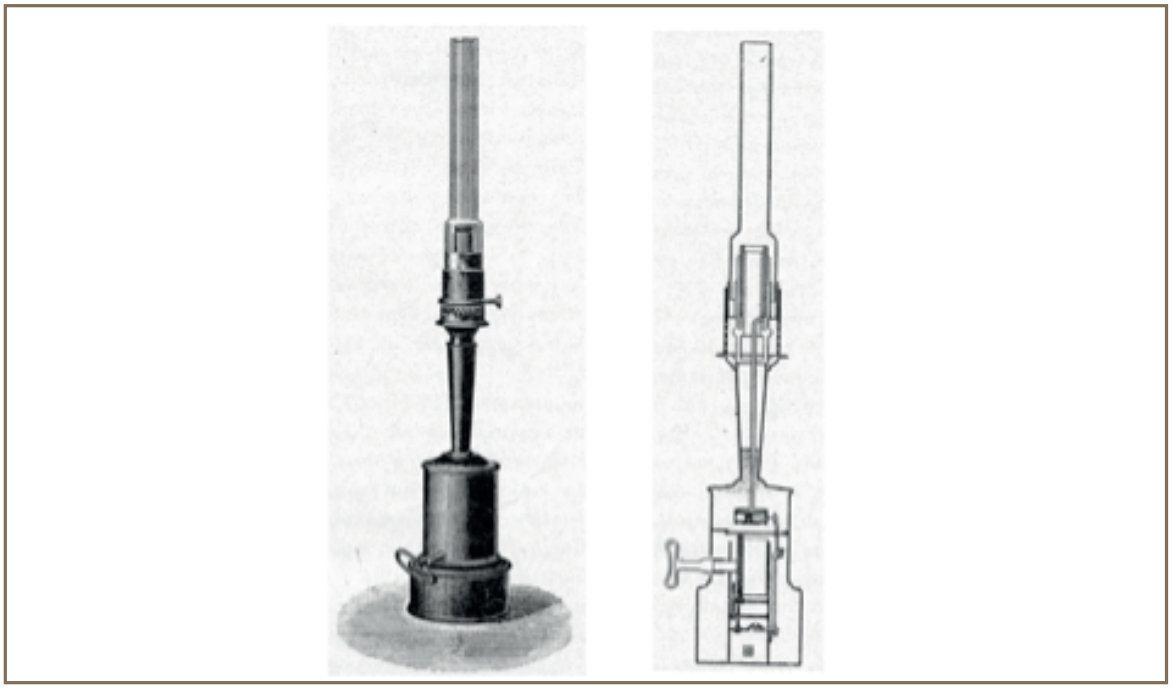
le premier photomètre visuel utilisant la loi de l'inverse carré de la distance. La même année, 1760, Johann Heinrich Lambert (1728-1777) publie un ouvrage intitulé *Photometria, sive de mesura et gradibus luminis colorum et umbrae*, qui énonçait les principes fondamentaux de la photométrie : loi de l'additivité des éclairements, loi de l'inverse carré de la distance, loi du cosinus de l'éclairement 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 XIXe 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 cm^2 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 % près[5].

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 IXe Conférence générale des Poids et Mesures en 1948 et précisée par la XIIIe 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 m^2 d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101 325 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 communication[6] 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 usuelles[7].

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)

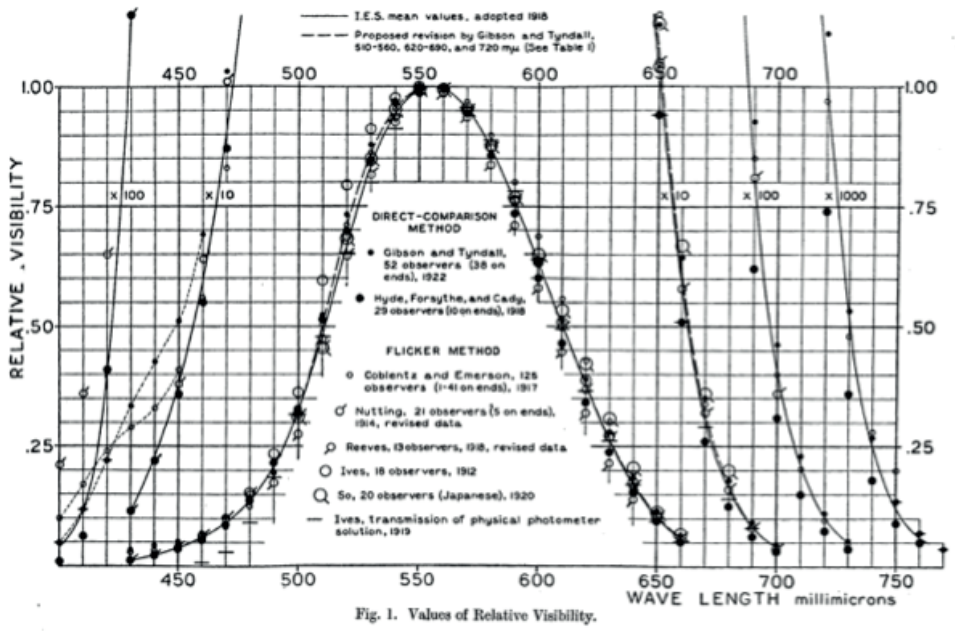


Fig. 1. Values of Relative Visibility.

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 XIXe 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 Lyon[8]. 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.

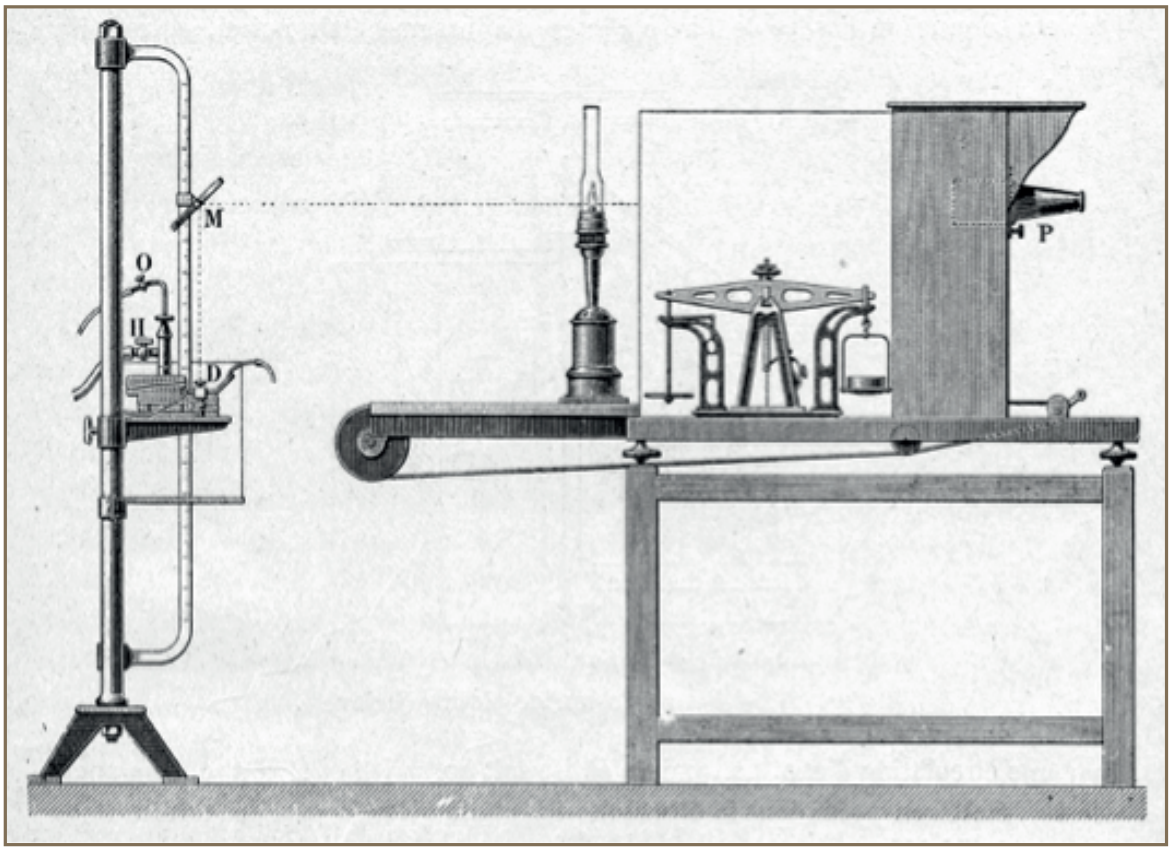
Au cours d'expériences préliminaires, Violle mesura, à l'aide d'une pile thermoélectrique et d'un galvanomètre, le flux énergétique provenant d'un bain d'argent pur fondu : il montra alors que ce flux était constant pendant toute la durée de la solidification, une propriété importante pour pouvoir faire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

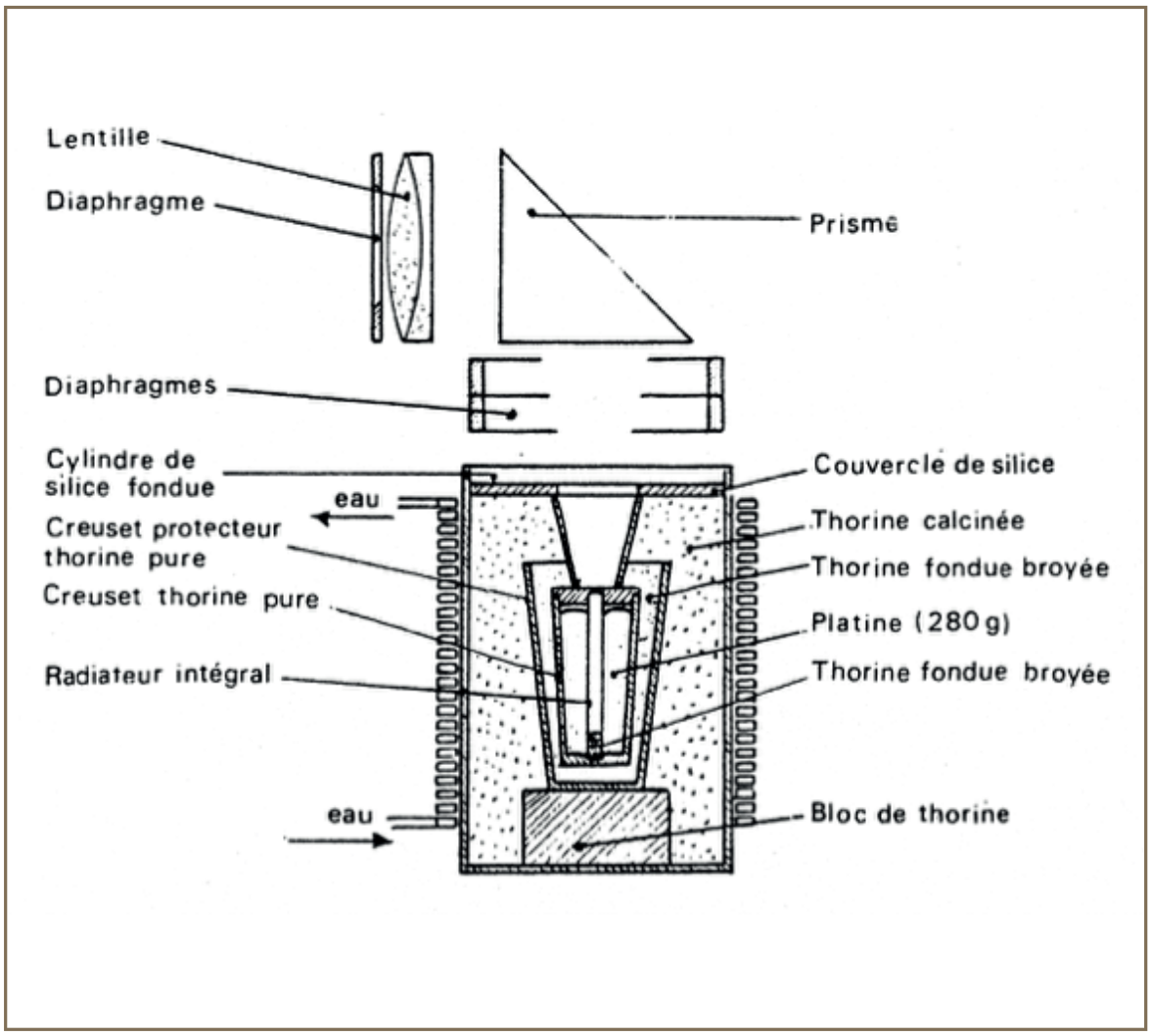
Nous l'avons signalé, l'année 1948 marque un tournant dans la photométrie. Dans le cadre des missions confiées au LNE concernant la réalisation des étalons métrologiques nationaux, la « candela française » est élaborée au LNE, selon la définition de la IXe Conférence générale des Poids et Mesures de 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 primaire 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 définition[9].

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 noir[10]. 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.



LNE, Cnam

Figure 5

Réalisation de la candela par Maurice Debure (1952)

pérature de couleur[11] (qui dans ce cas est de 2 042 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, recommandé 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 2 042 K à environ 2 357 K et permet, également, de passer de 2 357 K à 2 793 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 inerte[12].

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 2 357 K. Toutefois, la matérialisation de la candela s'effectue actuellement le plus souvent à 2 854 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 2 300 K, celle à filament de tungstène sous atmosphère neutre jusqu'aux environs de 2 800 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 2 042 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 2 042 K, à 2 357 K et à 2 854 K, ainsi que le lumen à 2 357 K et à 2 793 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-Prévost 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-Prévost 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'INM[13]. 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 automatiser[14]. Cette installation a été étudiée pour prendre également en compte le développement qu'ont connu, dans les années 1950-1960, les nouvelles sources lumineuses[15] 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 1/10e 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 automatique[16].

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.

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 XVIe 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].

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 2 042 K fut effectuée. L'étalonnage par la méthode visuelle était assuré avec une dispersion des mesures d'environ 2.10^{-3}, alors que l'accord des mesures photoélectriques était de l'ordre de 6.10^{-4}.

17 Elle fixe la valeur de la constante Km 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.

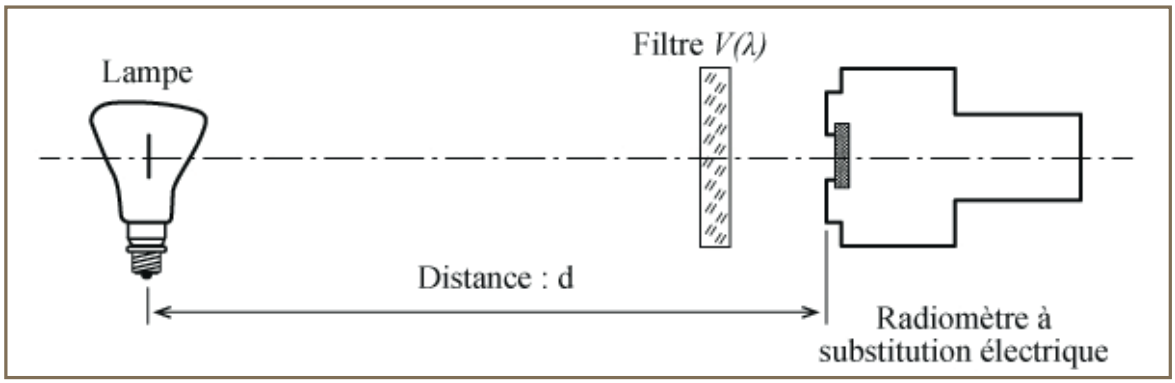
Cette liberté implique de faire des choix, et la conception du dispositif est un véritable défi technique pour lequel il faut : concevoir chaque instrument du dispositif, caractériser avec la plus grande précision possible chacun de ces instruments, déterminer toutes les sources d'incertitudes. Le dispositif choisi repose sur une accumulation déjà importante de savoir-faire au sein de l'INM, une expérience 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 1/10e 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

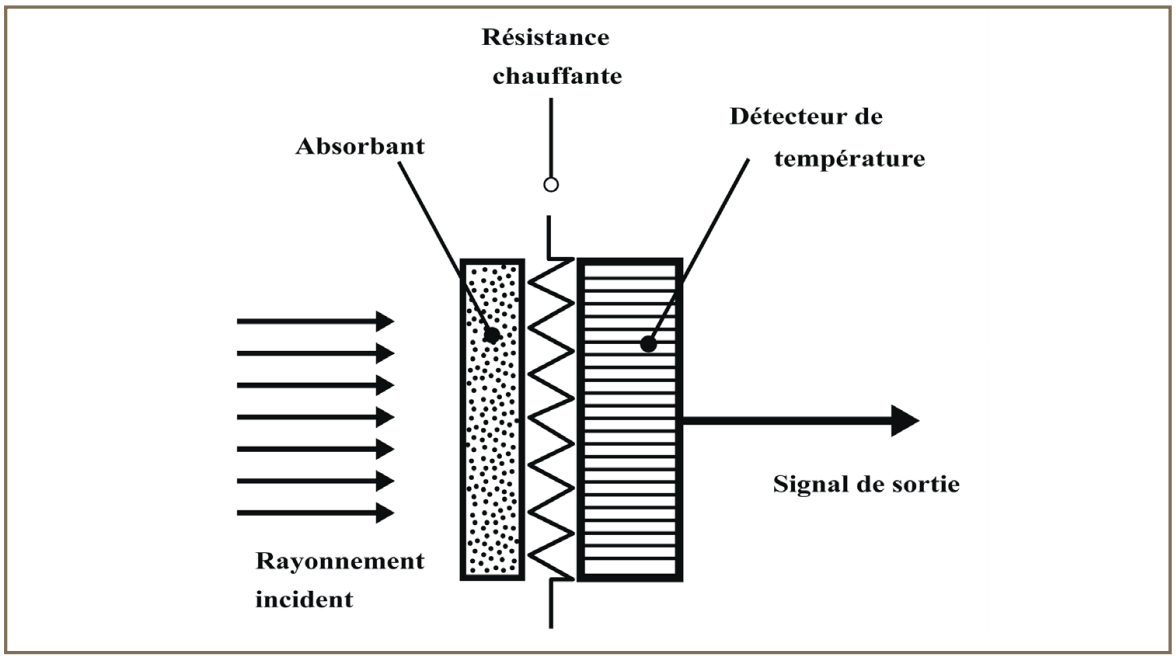
Principe de réalisation de la candela utilisé à l'INM

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 récepteur. 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 échauffe 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

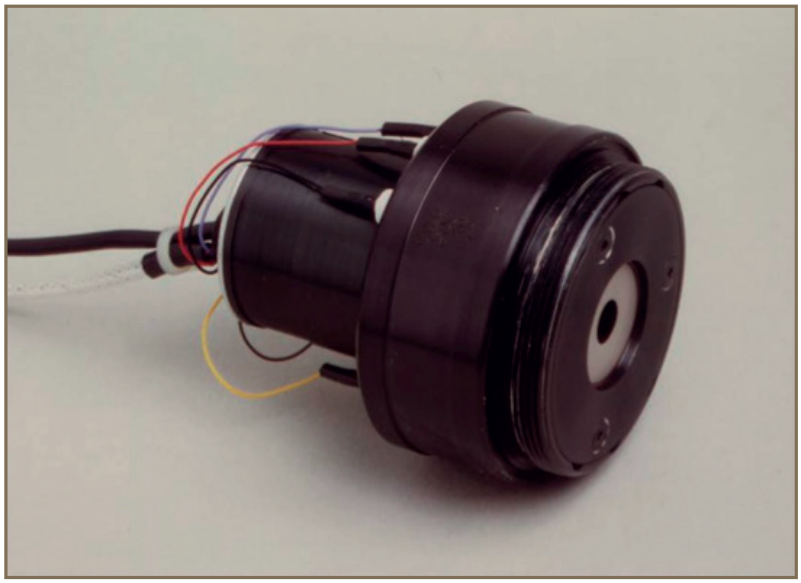
Dans les années 1980 de nombreux progrès avaient été réalisés pour ce type de détecteur et il était possible de trouver sur le marché quelques appareils de très bonne qualité, adaptés à la mesure des flux dans le domaine de la photométrie classique. L'INM a pu s'en équiper et en a effectué la caractérisation métrologique, nécessaire pour le montage de la candela[18] (figure 8).

- *Réalisation de la candela (1re 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

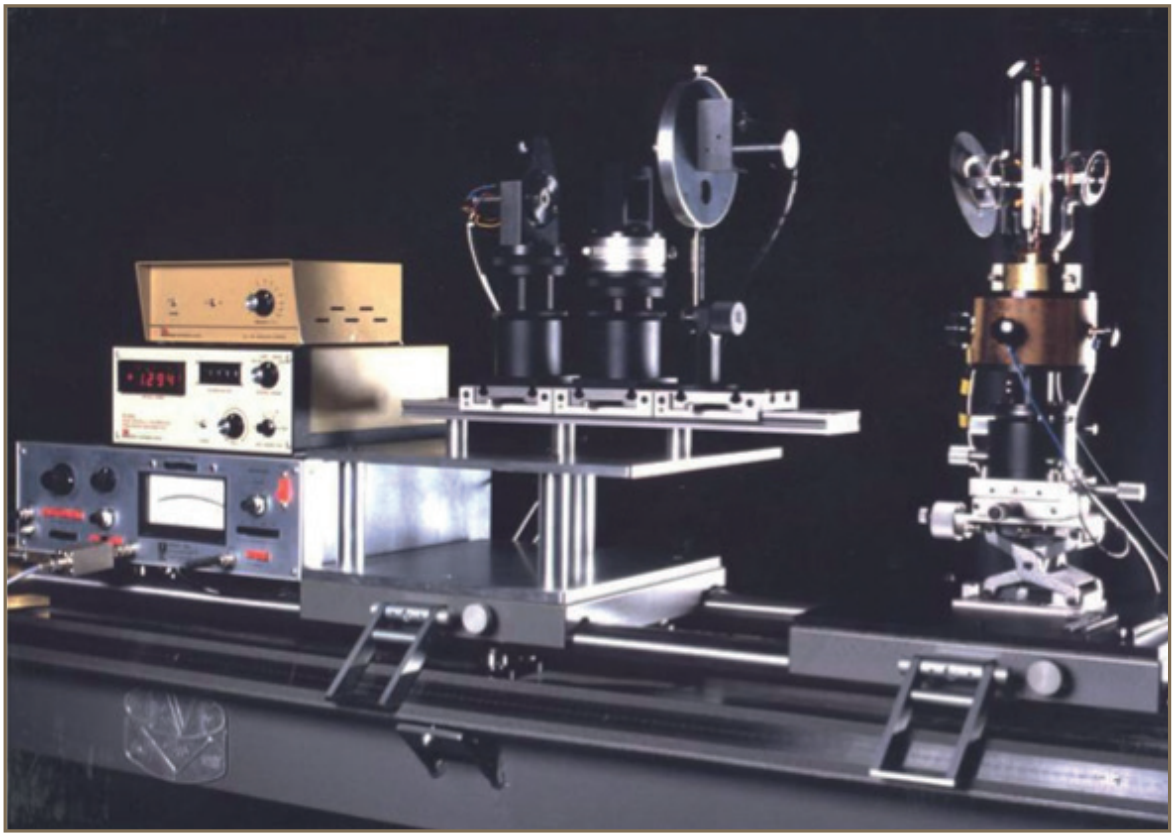
18 La caractérisation du radiomètre nécessite la mesure du flux qui n'est pas absorbée par la surface. Pour réaliser cette mesure il a été nécessaire de construire un petit gonioréflectomètre simplifié. Ce travail a été effectué par Michel Pichon dans le cadre d'un travail pratique de cycle C du Cnam (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 $2{,}2.10^{-3}$.



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 $3{,}0.10^{-3}$ (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 travaillant 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.

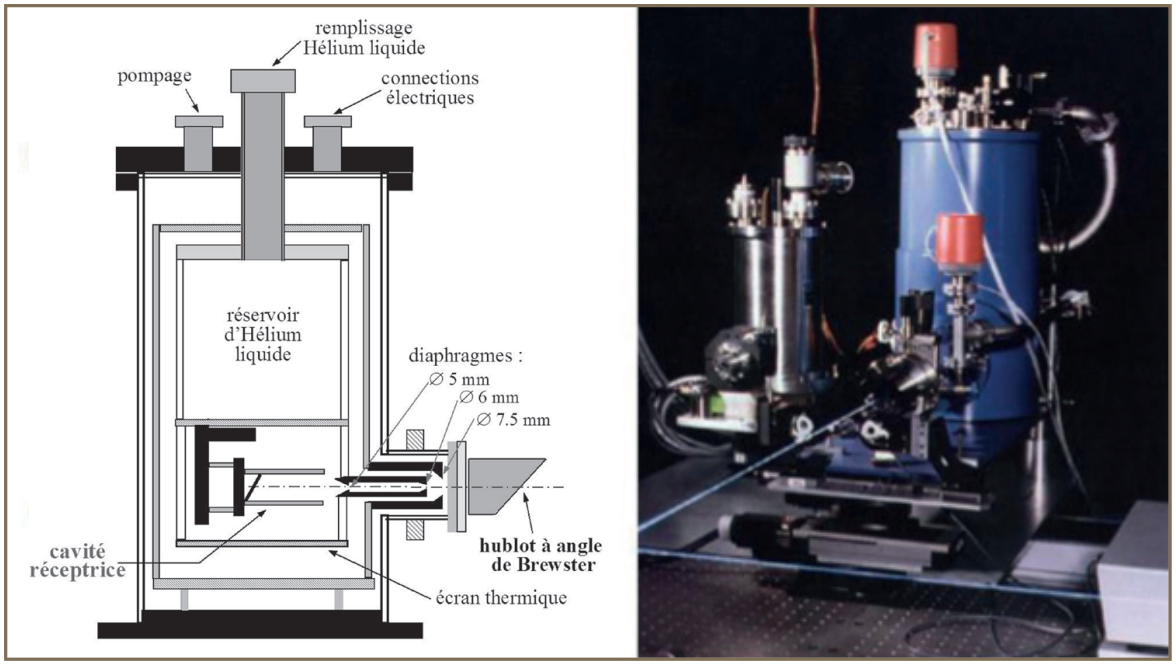
- *Le radiomètre à substitution électrique cryogénique (Touayar* et al.*, 1993)*

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 radiomètre 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 phototransistor[19] 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 cm^2, 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 sortie[20] – (Bastie et Lecollinet, 1993) (Lecollinet et Bastie, 1993 et 1995).
- la sensibilité spectrale[21] – (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-pression » 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

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 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 – 2e 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 $3{,}0.10^{-3}$ (1σ) : 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'interréflexion 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)

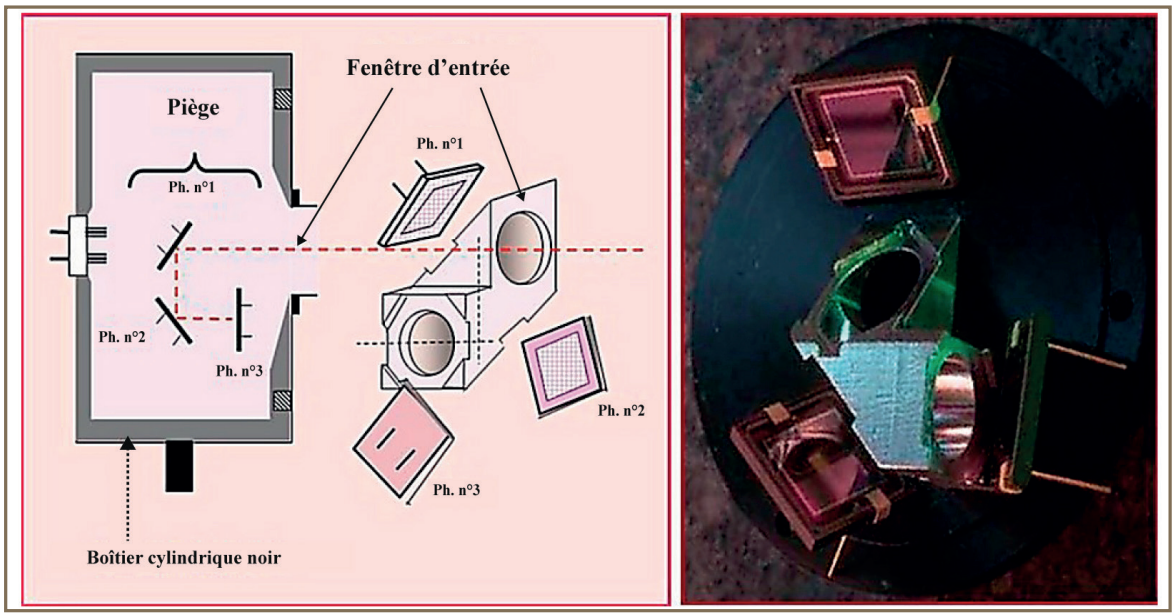
Sur ces constats, et pour poursuivre les travaux, il était impératif de réviser, étudier et caractériser à nouveau le détecteur. Les détecteurs au silicium, comme indiqué précédemment, ont un facteur de réflexion relativement élevé, c'est-à-dire qu'ils n'absorbent qu'une partie du rayonnement incident. 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 mm^2) a permis d'envisager la réalisation de photomètre utilisant des détecteurs pièges dans de bonnes conditions.

• *Réalisation de la candela – 3e 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

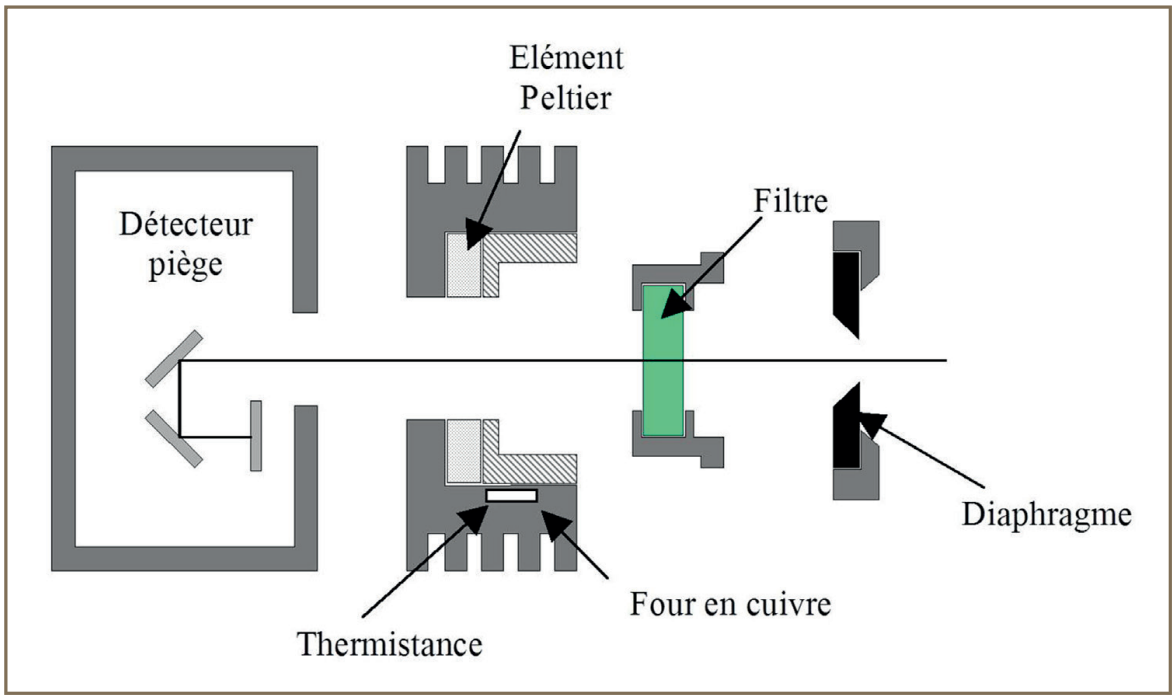
Schéma d'un piège optique réalisé avec des photodiodes

à la température, sont placés dans un four dont la température est régulée un peu au-dessus de la température ambiante[22].

L'incertitude sur la nouvelle réalisation de la candela est de $2{,}2.10^{-3}$. 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 1.10^{-3} à 5.10^{-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 chauffe, 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

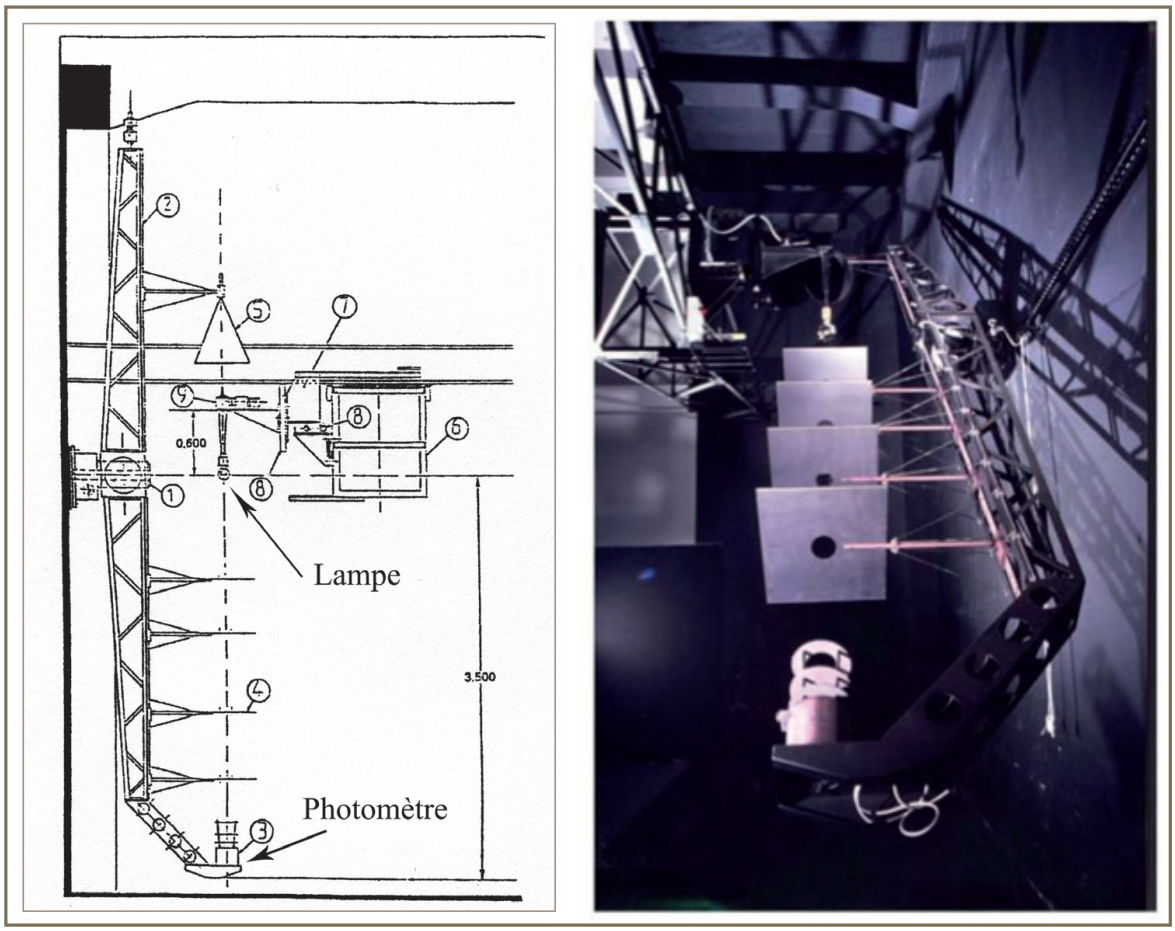
La candela est l'une des unités de base du Système international d'unité (SI), il entrait donc dans les missions de l'INM de réaliser sa matérialisation avec une incertitude aussi faible que possible. Mais l'unité photométrique qui intéresse le plus les utilisateurs est le lumen. Elle est matérialisée 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°/s et une incertitude sur le positionnement angulaire de 0,02°. 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 5.10^{-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.* 6e 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., Sapritsky, 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, 3e 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. » *9e 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. » *7e 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 8e 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 gonioréflectomètre. » *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 10e 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., Chunnilall, C. J., Crosson, S. C., Duewer, 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 standars 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, 2e édition.

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