

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - https://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

NOTICE DE LA REVUE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Auteur(s)	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 193.-195.
Nombre de volumes	125
Cote	CNAM-BIB P 1329-B et P 1329-C
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Note	La collection comporte des lacunes : n°24; n°58; n°63; n°67; n°76-n°77
Notice complète	https://www.sudoc.abes.fr/cbs//DB=2.1/SET=17/TTL=3/REL?PPN=261820893&RELTYPE=NT
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B_P1329-C
LISTE DES VOLUMES	
	N°25 (1936)
	N°26 (1937)
	N°27 (1937)
	N°28 (1937)
	N°29 (1938)
	N°30 (1939)
	N°31 (1936)
	N°32 (1938)
	N°33 (1938)
	N°34 (1938)
	N°35 (1938)
	N°36 (1938)
	N°37 (1938)
	N°38 (1938)
	N°39 (1938)
	N°40 (1939)
	N°41 (1939)
	N°42 (1939)
	N°43 (1939)
	N°44 (1939)
	N°45 (1938)
	N°46 (1940)
	N°47 (1940)
	N°48 (1940)
	N°49 (1940)
	N°50 (1940)
	N°51 (1941)
	N°52 (1941)
	N°53 (1941)
	N°54 (1941)
	N°55 (1942)
	N°56 (1942)
	N°57 (1942)
	N°59 (1942)

	N°60 (1941)
	N°61 (1942)
	N°62 (1943)
	N°64 (1943)
	N°65 (1943)
	N°66 (1943)
	N°68 (1943)
	N°69 (1943)
	N°70 (1943)
	N°71 (1943)
	N°72 (1944)
	N°73 (1943)
	N°74 (1944)
	N°75 (1944)
	N°78 (1944)
	N°79 (1944)
	N°80 (1944)
	N°81 (1944)
	N°82 (1944)
	N°83 (1944)
	N°84 (1944)
	N°85 (1944)
	N°86 (1945)
	N°87 (1945)
	N°88 (1945)
	N°89 (1945)
	N°90 (1945)
	N°91 (1945)
	N°92 (1945)
	N°93 (1945)
	N°94 (1945)
	N°95 (1946)
	N°96 (1946)
	N°97 (1946)
	N°98 (1944)
	N°99 (1945)
	N°100 (1945)
	N°101 (1946)
	N°102 (1946)
	N°103 (1946)
	N°104 (1946)
	N°105 (1946)
	N°106 (1946)
	N°107 (1947)
	N°108 (1947)
	N°109 (1947)
	N°110 et 111 (1947)
	N° 112 (1947)
	N° 113 (1947)
	N° 114 (1947)
	N° 115 (1947)
	N° 116 (1947)
	N° 117 (1947)
	N° 118 (1948)
	N° 119 (1948)
	N° 120 (1948)
	N° 121 (1948)
	N° 122 (1947)

	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 143 (1950)
	N° 144 (1950)
	N° 145 (1951)
	N° 146 (1951)
	N° 147 (1951)
	N° 148 (1951)
	N° 149 (1951)
	N° 150 (1951)
	N° 151 (1951)
	N° 152 (1951)
	N° 153 (1952)
	N° 154 (1952)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	N° 155 (1952)

NOTICE DU VOLUME TÉLÉCHARGÉ	
Auteur(s) volume	Laboratoire d'essais mécaniques physiques chimiques et de machines du Conservatoire national des Arts et Métiers
Titre	Publication : Laboratoire d'essais
Volume	N° 155 (1952)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1952
Collation	1 vol. (p. [529-543]) : ill. ; 25 cm
Nombre de vues	20
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (96)
Sujet(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France) Génie industriel -- 20e siècle
Thématique(s)	Histoire du Cnam
Typologie	Revue
Langue	Anglais Français
Date de mise en ligne	10/04/2025
Date de génération du PDF	07/02/2026
Recherche plein texte	Disponible
Notice complète	https://www.sudoc.fr/039014541
Permalien	https://cnum.cnam.fr/redir?P1329-B.96

...

8^e Ke 107 (91)

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LABORATOIRE D'ESSAIS



P13227-B

L'ÉTALON PRIMAIRE D'INTENSITÉ LUMINEUSE
ET L'ÉCHELLE PHOTOMÉTRIQUE AU
CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

par M.M. M. Debure et N. Leroy

Publication n° 155
(Extrait de la Revue d'Optique, T. 31 n° 12. 1952)





L'ÉTALON PRIMAIRE D'INTENSITÉ LUMINEUSE ET L'ÉCHELLE PHOTOMÉTRIQUE AU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

par Maurice DEBURE et Norbert LEROY

SOMMAIRE. — L'élaboration, au Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers, d'une nouvelle échelle des valeurs des grandeurs photométriques a exigé en premier lieu la réalisation de l'étalon primaire d'intensité lumineuse sous la forme d'un radiateur intégral (corps noir) fonctionnant à la température de solidification du platine. Bien qu'aucune forme particulière de radiateur intégral ne soit précisée par le Comité International, les spécifications décrites par le National Bureau of Standards (N.B.S.) dans les procès-verbaux du Comité International des Poids et Mesures (C. I. P. M.) de 1931 furent observées en faisant usage d'éléments réfractaires en thoria pure fondue, fabriqués au Laboratoire d'Essais. L'appareillage (corps noir, dispositifs optique et photométrique) et la conduite des mesures sont décrits. La luminance du radiateur intégral, déterminée en fonction de la bougie internationale telle qu'elle était conservée en France jusqu'en 1948, fut trouvée égale à 58,82 bougies int. par cm^2 . La conservation des unités photométriques (intensité et flux lumineux) au moyen de lampes étalons secondaires fonctionnant aux températures de couleur imposées, est décrite également.

SUMMARY. — The setting up at the « Laboratoire d'Essais du Conservatoire National des Arts et Métiers » of a new photometric scale has first required the realization of the primary standard of light in the form of a Planckian radiator (black body) at the temperature of solidification of molten platinum. Though any particular form of Planckian radiator is not specified by the International Committee, the specifications described by the N. B. S. in the reports of the C. I. P. M. (1931) have been adhered to by using a fused thoria crucible made at the Laboratoire d'Essais. The equipment (black body, optical and photometric arrangements) and the execution of the measures are described. The luminance of the full radiator, determined as a function of international candle such as it was kept in France until 1948, has been found equal to 58,82 candles per square centimeter. The maintenance of the photometric units (luminous intensity and luminous flux) by means of sub-standards lamps operating at the prescribed colour temperatures is also described.

I. — INTRODUCTION

Dès 1896, Blondel proposa de modifier l'étalon Violle en employant une enceinte fermée isotherme avec le platine en fusion. Waidner et Burgess proposèrent en 1908 d'employer une enceinte rayonnante creuse placée dans un métal fondu en cours de solidification. Les travaux remarquables de Ives utilisant un « corps noir » en forme de cylindre de platine et de P. Fleury réalisant un corps noir dans un four à tube de carbone pouvant fonctionner à températures plus élevées, conduisirent la Commission Internationale de l'Eclairage, en 1924, à recommander l'adoption, comme étalon primaire de lumière, de la luminance d'un corps noir utilisé dans des conditions sujettes à définition précise, et à recommander aux Laboratoires nationaux d'étudier la construction et les conditions d'emploi d'un corps noir comme étalon de lumière.

Les physiciens du N. B. S., reconsidérant la proposition faite par Waidner et Burgess en 1908, mirent au point en 1931 la réalisation d'un corps noir stable et reproductible au point de solidification du platine.

Ces résultats très encourageants amenèrent le Comité Consultatif d'Electricité du C. I. P. M. à conseiller aux divers Laboratoires nationaux l'étude de la reproduction de l'étalon Waidner-Burgess. C'est ainsi qu'en France, le Comité National Français de l'Eclairage, dans sa séance du 12 novembre 1930, chargea le Professeur Ribaud de reproduire l'étalon américain et d'effectuer une mesure de sa luminance en bougies internationales. Les expériences réalisées à la Faculté des Sciences de Strasbourg et les résultats obtenus furent décrits dans un mémoire publié par la *Revue d'Optique* en août 1933 et dans un rapport au Comité Consultatif d'Electricité et de Photométrie en 1933.

Dans sa session de juin 1937, le C. I. P. M. vota la Résolution suivante : « A partir du 1^{er} janvier 1940, l'unité d'intensité lumineuse sera telle que la brillance du radiateur intégral, à la température de solidification du platine, soit de 60 unités d'intensité par centimètre carré. Cette unité sera appelée la bougie nouvelle ».

En juin 1939, le Comité Consultatif de Photométrie adopta la Résolution 3 dont le paragraphe 2 précise l'étalon primaire : « Cet étalon, adopté en principe par le C. I. P. M. en 1930 et en 1933 est un radiateur de Planck (corps noir) à la température de solidification du platine, et la valeur de l'unité d'intensité lumineuse (adoptée en 1937) est telle que la brillance de l'étalon soit de 60 unités par centimètre carré. La forme sous laquelle cet étalon est réalisé actuellement est, dans ses traits essentiels, celle qui a été conçue par le N. B. S. à Washington, et qui se trouve décrite dans les procès-verbaux du C. I. P. M. de 1931. La couleur de la lumière fournie par l'étalon ne diffère pas sensiblement de celle qui est émise par les lampes électriques à filament incandescent conservées dans les Labora-

toires nationaux. » Il faut remarquer que, dans la définition de l'étalon de lumière, aucune forme particulière de radiateur intégral n'est spécifiée.

Le C. I. P. M., ayant pu se réunir en octobre 1946, approuva la Résolution concernant le changement des unités photométriques en ces termes :

« En vertu des pouvoirs qui lui ont été conférés par la Conférence Générale des Poids et Mesures en 1933, le Comité International, reprenant la résolution votée dans sa session de 1937 et se référant au vœu adopté par le Comité Consultatif de Photométrie en 1939 avec une modification concernant la date d'application, décide que la « bougie nouvelle » devra entrer en vigueur à partir du 1^{er} janvier 1948.

Le Comité International adopte sans modifications la Résolution 3 concernant les unités photométriques, qui lui avait été soumise en 1939 par le Comité Consultatif de Photométrie ».

La IX^e Conférence Générale des Poids et Mesures tenant son assemblée du 12 au 21 octobre 1948 approuva les décisions prises par son Comité et confirma, en outre, pour la nouvelle unité d'intensité lumineuse le nom de « candela » au lieu de « bougie nouvelle » qui avait été choisi en 1937.

Il était donc nécessaire de modifier la loi du 2 avril 1919 sur les unités de mesure, ainsi que le décret du 26 juillet 1919, qui avaient conservé l'étalon Violle dont le vingtième représentait la bougie décimale (bougie internationale). La loi du 14 janvier 1948 et le décret du 28 février 1948 sanctionnèrent la « bougie nouvelle » ainsi que les unités de flux lumineux et d'éclairement. En annexe du décret de 1948 figure le Tableau général des unités légales commerciales et industrielles. Rappelons aussi que l'article 3 de la loi du 2 avril 1919 ordonne que « les étalons nationaux établis pour représenter les unités principales et les unités secondaires sont déposés au Conservatoire National des Arts et Métiers ». Pendant plus de 12 ans, la loi resta « lettre morte ». Les étalons nationaux (mètre et kilogramme) demeurèrent aux Archives Nationales. Enfin, sur l'intervention du Président Painlevé, la loi du 28 décembre 1931 permit la construction du Dépôt des Etalons Nationaux qui fut aménagé en 1933. Son statut a été fixé par le Bureau National Scientifique qui, dans sa séance du 28 juillet 1933, lui assigna les divers articles de sa mission dont les principaux sont :

1°) conservation des étalons français représentant les unités principales et secondaires définies par la loi du 2 avril 1919 ;

2°) création et construction des étalons représentant l'ensemble des unités métriques prévues par la loi du 2 avril 1919.

En exécution de l'arrêté du 11 août 1936, le Dépôt fut rattaché au Laboratoire d'Essais sous le nom de « Section des Etalons Nationaux du Système Métrique ».

En septembre 1943, le groupe de lampes conservant la « bougie internationale » (2 080° K) et le groupe des lampes conservant la « bougie nouvelle » (2 046° K et 2 360° K) furent transférés au Laboratoire d'Essais.

II. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1. **Le corps noir.** — Sa construction a été réalisée en se conformant aux « spécifications pour l'étalon de lumière » résumées dans le rapport de Mr Burgess, Directeur du N.B.S., publié en même temps que les Procès-Verbaux des séances du C. I. P. M. de 1931.

La disposition générale du creuset, du tube radiateur et des pièces réfractaires accessoires est schématisée sur la figure 1. Les dimensions spécifiées sont les suivantes :

Diamètre intérieur du creuset	en haut	22 mm \pm 2 mm
	à la base	17 mm \pm 2 mm
Profondeur intérieure du creuset.....		45 mm \pm 5 mm
Diamètre intérieur du tube de visée		2,5 mm \pm 0,2 mm
Épaisseur des parois du tube de visée.....		entre 0,25 et 0,50 mm

Le réfractaire employé dans la construction des diverses parties de l'ensemble « corps noir » est la thorine pure fondue pulvérisée et agglomérée à haute température. Nous avons jusqu'à ce jour construit 5 ensembles et nous résumerons brièvement la méthode employée qui eut comme point de départ celle décrite par les physiciens du N. B. S. en 1931 : l'oxyde de thorium pur est obtenu à partir du nitrate de thorium qui contient toujours un peu de sulfate. Après une longue série de précipitations par l'ammoniaque, lavages et centrifugations de la thorine hydratée, suivie d'une retransformation en nitrate, puis en oxalate que l'on calcine à basse température, on obtient de l'oxyde parfaitement blanc et pur. Pour opérer la fusion, il faut avoir recours à l'arc électrique (330 volts, 150 ampères). La thorine fond à 3 000° C environ, mais n'est pas conductrice. On obtient ainsi des morceaux de quelques grammes ; l'arc s'éteint et il faut séparer de la poudre l'oxyde qui a été fondu, avec une baguette de quartz. On opère en atmosphère oxydante ; malgré cela, il se forme une petite quantité de carbure de thorium ; les traitements ultérieurs à l'acide l'élimineront facilement. Cet oxyde est d'une dureté exceptionnelle. On le broye au mortier d'acier, finement. On tamise (n° 160) et on purifie. En effet, le graphite des électrodes contient un peu de silice, de fer, et le mortier a apporté un peu de fer également. D'où la nécessité de faire agir, dans une capsule de platine, de l'acide chlorhydrique, puis de l'acide sulfurique et de l'acide fluorhydrique. L'ébullition au bain de sable dure plusieurs heures. On lave à l'eau acidulée, puis on calcine à haute température pour brûler le carbone restant. Il faut signaler qu'environ 5 % de thorine fondue sont dissous dans l'acide.

Pour la réalisation des creusets, on emploie un moule de graphite pur (US spécial) pour recevoir le creuset. La poudre de thorine fondue, finement pulvérisée au mortier d'agate, est transformée en pâte à l'aide d'une solution de chlorure de thorium préparée au laboratoire (1 gr pour 5 cm³ d'eau). Elle est tassée dans le moule autour d'un mandrin, à l'aide d'une spatule. On enlève le mandrin à la fin

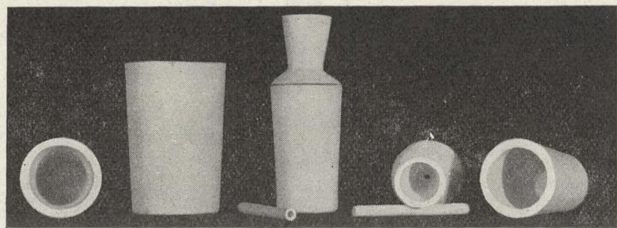


FIG. 2. — Creusets, tubes et couvercles en thorine pure.

Pour éviter toute contamination extérieure du creuset, la cuisson est faite en le plaçant dans un creuset protecteur, également en thorine fondue et de plus grandes dimensions. La cuisson doit être conduite avec prudence, car de légers chocs thermiques peuvent produire des fissures dans la paroi du creuset.

On obtient ainsi des creusets sonores, résistant à un très grand nombre de fusions de platine (fig. 2).

2. **Le platine.** — Le platine utilisé dans nos expériences est un platine spécialement purifié par le Comptoir Lyon-Alemand, et qui nous a été livré sous la forme de « mousse de platine ». C'est avec cette « mousse » que le creuset est progressivement rempli de platine après 8 ou 9 fusions successives. La pureté du platine est telle que le rapport de la résistance électrique à 100°C à la résistance à 0° est $1,391_6$. Bien qu'aucune évolution systématique des résultats photométriques n'ait pu être décelée, nous avons procédé, après nos séries de mesures (environ 50 fusions) à la détermination du rapport R_{100}/R_0 du platine extrait du creuset. Le Comptoir Lyon-Alemand a bien voulu nous étirer des fils de 0,1 millimètre, ce qui nous a permis de réaliser une sonde thermométrique (à 4 fils) de 20 ohms environ. Sa valeur aux points fixes 0°C et 100°C a été mesurée à l'aide du pont de Smith du Service de Métrologie. La valeur obtenue $1,390_3$ indique que la contamination du métal au cours des fusions successives a été extrêmement faible.

3. **Le mode de chauffage.** — « La chauffe doit être faite par l'induction électromagnétique, la chaleur étant engendrée directement dans le platine ». Le four à induction à haute fréquence (600 000) que nous avons employé est alimenté par un générateur H. F. à triode du type Mazda 3 T 4 000 Al. La puissance appliquée à l'entrée de l'installation est de l'ordre de 2,500 kilowatts. Le réglage, très souple, de l'installation est obtenu au moyen d'une self placée sur le circuit du transformateur de charge. L'installation est prévue pour une puissance consommée de 7 kilowatts. Pendant la durée des paliers de solidification, la surveillance de la constance de l'énergie apportée à l'enroulement du four est assurée à l'aide d'un dispositif utilisant une cellule photoélectrique. Il convient en effet de se méfier des variations lentes du secteur et d'y remédier promptement.

4. **Le dispositif optique.** — Il est nécessaire de former sur l'écran du photomètre une image réelle de l'ouverture du « corps noir », ce qui exige l'emploi d'un système formé d'un prisme à réflexion totale (arête 50 mm) et d'une lentille achromatique (distance focale 16 centimètres). Contre la lentille, on dispose un diaphragme circulaire servant à définir l'angle solide employé. Le facteur de transmission du système prisme-lentille a été déterminé par une méthode classique qui consiste à déterminer, à l'aide du photomètre, le rapport d'éclairements produits par une source de luminance uniforme et constante vue directement, puis après interposition du système prisme-lentille. Le plan de luminance uniforme et constante est obtenu par le dispositif que MM. Terrien et Desvignes ont décrit dans la *Revue d'Optique* (janvier 1949). La température de couleur de la lumière fournie par la source et celle de la lampe de comparaison sont rendues égales à celle du radiateur intégral.

De nombreuses mesures effectuées à des époques différentes et en refaisant chaque fois le montage ont donné comme moyenne de 25 déterminations du facteur de transmission : 0,756, connu avec une certitude de 0,2 %.

La protection du prisme contre l'échauffement est obtenue au moyen de diaphragmes convenables et un léger courant d'air évite la contamination de la face inférieure du prisme.

Le diaphragme placé contre la lentille a été usiné à partir d'une plaque de laiton parfaitement plane ($e = 3$ mm). Il comporte en son centre un trou circulaire à bords tranchants dont les diamètres, suivant 4 directions, ont été mesurés sur la machine à mesurer *S. I. P.* du Laboratoire de Métrologie, permettant de reporter les longueurs étudiées sur un mètre étalon ($t = 20^\circ \text{C}$). Quatre écrans ont été ainsi étudiés. Le diaphragme employé s'est montré circulaire à 1 micron près. Son diamètre moyen est 23,011 millimètres. Sa surface est égale à 4,1587 cm², avec une incertitude de 1/10 000. Le four est installé sur une plateforme munie d'un dispositif de blocage et de 4 vis calantes permettant d'assurer la verticalité de l'axe du corps noir et son centrage sur les diaphragmes. Le prisme et la len-

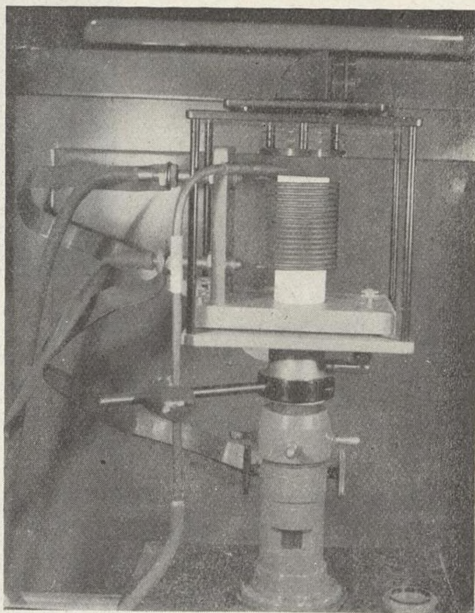
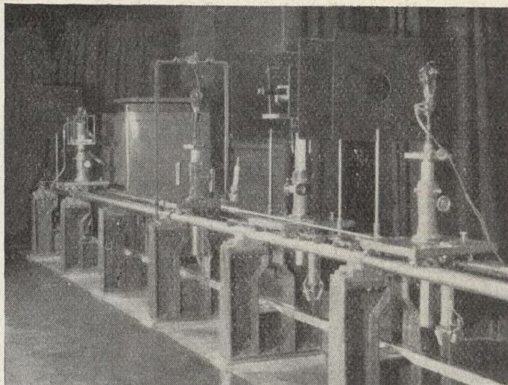


FIG. 3. — Four H.F. et dispositif optique.



FIG. 4. — Disposition générale du banc photométrique pendant les mesures : corps noir, lampe étalon, photomètre, lampe tare.



tille sont fixés sur une semelle orientable permettant le centrage de l'image du trou de visée sur l'écran circulaire du photomètre. La monture commune à la lentille et au diaphragme K est fixée sur une glissière dont les mouvements, commandés par une vis, permettent la mise au point de l'image dans le plan de l'écran photométrique (fig. 3).

5. **Le dispositif photométrique.** — Le dispositif photométrique a été installé sur le grand banc photométrique de 12 mètres de longueur du Laboratoire de Métrologie. Le four H. F. et le dispositif optique (prisme et lentille) sont portés par un premier chariot ; la tête de photomètre Lummer et Brodhun est installée sur un deuxième chariot. Ces deux patins sont immobilisés par un frein sur le banc. Un troisième et un quatrième chariots, mobiles, portent respectivement la lampe étalon et la lampe tare (fig. 4).

Parallèlement au banc photométrique court une règle en invar. Chaque chariot porte un petit appareil de projection qui projette sur un écran en verre dépoli (grandissement 2,5) la région utile de la règle divisée et permet ainsi de repérer la position du chariot avec une incertitude de 0,1 mm au maximum.

III. — LES MESURES

Elles ont pour but :

- a) la détermination de la luminance du corps noir en fonction de la « bougie internationale » telle qu'elle était conservée par le groupe de lampes françaises à filament de carbone fonctionnant à la température de couleur 2 080° K environ ;
- b) l'établissement d'une série de lampes étalons secondaires à filament de carbone, lampes dont les valeurs sont déterminées directement par rapport à l'étalon primaire, et qui serviront d'étalons de référence dans la pratique courante.

1. **Principe des mesures** (fig. 5). — Rappelons le brièvement. La lentille achromatique L ($f = 16$ cm) placée à la suite du prisme P donne une image de

I. Equilibre photométrique : lampe tare-étalon primaire.

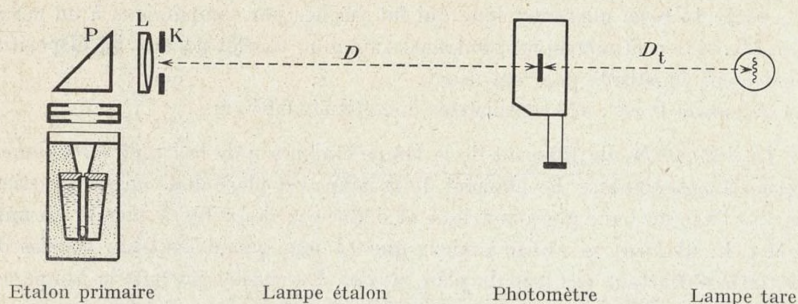
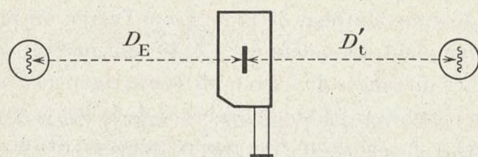


FIG. 5. — Schéma des mesures.

II. Equilibre photométrique : lampe tare-lampe étalon.



L'ouverture du corps noir, qui couvre largement l'écran diffusant du photomètre Lummer-Brodhun. Le diaphragme K, de surface $A \text{ cm}^2$, placé en avant et près de la lentille, définit l'angle solide du faisceau. Si T est la transmission de l'ensemble prisme-lentille, l'éclairement de l'écran du photomètre est BAT/D^2 , B représentant la luminance du corps noir et D la distance fixe du diaphragme à l'écran du photomètre. La seconde plage du photomètre est éclairée par une lampe tare alimentée sous une tension constante telle que les deux plages du photomètre ont même coloration. On réalise un premier équilibre photométrique qui détermine la distance D_t de la tare au photomètre. Après avoir mis en place sur le banc la lampe étalon d'intensité I bougies à la distance fixe D_E de l'écran du photomètre, on réalise un deuxième équilibre photométrique qui détermine la distance D_t' de la tare au photomètre. La luminance du corps noir s'obtient par la formule :

$$B = \frac{I}{AT} \left[\frac{D}{D_E} \times \frac{D_t'}{D_t} \right]^2.$$

2. Exécution des mesures.

A) *Les mesures géométriques*, en plus de la mesure de l'aire du diaphragme K, comportent l'évaluation précise des distances suivantes :

1° *La distance D* du diaphragme K à l'écran du photomètre, a été ajustée pour que l'image du trou de visée couvre l'écran. Le diamètre de l'image est de 50 mm environ. La partie utilisée de l'écran a 30 mm de diamètre. Cette distance est mesurée à l'aide d'un étalon à bouts sphériques préalablement comparé à un

mètre étalon par notre Service de Métrologie. La mesure du complément s'effectue sur la règle du banc photométrique qui fut vérifiée par comparaison à un mètre étalon (division centimétrique) par translation d'un chariot portant les dispositifs spécialement construits pour cet usage.

La valeur de D est : 428 centimètres, incertitude 0,04 cm.

2° La distance D_E du filament de la lampe étalon (ou de la lampe à étalonner) à l'écran du photomètre. Le filament de la lampe est placé dans un plan vertical normal à l'axe du banc photométrique et défini par deux fils à plomb. La mise en place du filament se réalise à mieux que 0,1 mm quand les deux boucles du filament ne s'écartent pas trop du plan moyen. Le chariot portant la lampe est muni des accessoires nécessaires pour incliner, tourner ou translater la lampe.

La distance du plan de référence à l'écran du photomètre est mesurée comme précédemment. Sa valeur est 139,40 centimètres, incertitude 0,03 cm.

3° Les distances de l'écran photométrique au filament de la lampe tare dans le cas du corps noir (D_t) ou dans le cas de la lampe étalon (D'_t) sont déterminées par rapport à une position fixe repère (position R) du filament de la lampe tare. La distance de cette position R à l'écran est mesurée par le même procédé que précédemment (124,88 centimètres). De plus, chacun des 10 centimètres qui suivent ou précèdent la position R sur la règle du banc photométrique ont été vérifiés par comparaison à la division centimétrique d'un mètre étalon, comme il a été précisé précédemment. La correction à apporter à la distance de l'écran au filament de la lampe tare en sa position moyenne est alors connue ; l'incertitude est de 0,03 cm.

B) Mesures photométriques.

1° *Cas du corps noir.* La couleur de la lampe tare est identique à celle du rayonnement du corps noir à la température de solidification du platine. Les comparaisons photométriques sont donc homochromes et les égalisations du champ photométrique peuvent être réalisées rapidement avec la meilleure précision. Il est alors possible d'exécuter de nombreux pointés au cours d'un palier de solidification, la lecture de la position du chariot portant la lampe tare étant faite immédiatement par un aide.

Les positions de la lampe tare correspondant aux pointés photométriques sont portées sur un graphique qui met nettement en évidence le palier de solidification et précise ainsi la série des pointés qui serviront à déterminer la position moyenne de la lampe tare, et par suite la distance D_t corrigée (fig. 6). Le réglage du générateur H. F. permet d'obtenir des paliers de solidification dont la durée a varié de 4 à 9 minutes, assurant ainsi l'exécution aisée de 25 à 50 pointés photométriques utilisables pour le calcul de la moyenne.

2° *Cas de la lampe étalon* (bougies internationales à 2 080° K environ). Sa température de couleur étant 35° K au-dessus de celle de la lampe tare, une

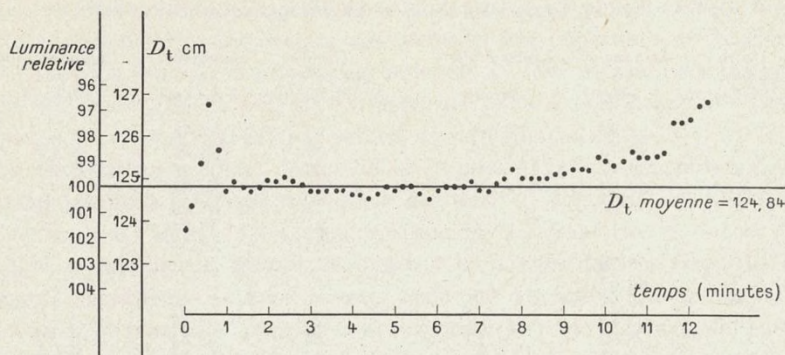


FIG. 6. — Palier de solidification.

petite différence de coloration des plages du champ photométrique apparaît. Elle n'est pas très gênante pour un observateur exercé employant la méthode des contrastes et, de plus, la nécessité d'exécuter rapidement les égalisations photométriques ne s'impose pas ici.

L'éclairement de l'écran du photomètre est d'environ 10 lux dans les comparaisons photométriques exécutées soit avec le corps noir, soit avec les lampes étalons. Les mesures sont faites pour approximativement la même luminance du champ photométrique, D_t et D'_t ayant des valeurs moyennes voisines.

IV. — LES RÉSULTATS

Nous avons employé 9 lampes étalons, choisies parmi le groupe des 24 lampes qui conservaient la bougie décimale jusqu'au 1^{er} janvier 1948. La valeur attribuée à chacune de ces lampes résulte des intercomparaisons effectuées sur le groupe entier peu de temps après son transfert au Laboratoire d'Essais. Trois études ont eu lieu durant l'année 1944 avec l'installation photométrique du Laboratoire d'Essais : la première eut lieu en janvier (MM. Wagnet et Debure), la deuxième en mars (MM. Wagnet et Debure), la troisième en décembre (MM. Jouaust et Debure). Ces 9 lampes ont été de nouveau comparées au groupe avant les mesures sur le corps noir.

1. Luminance du corps noir. — La détermination de la luminance du corps noir à la température de solidification du platine a porté sur 30 paliers de solidification exécutés entre février et octobre 1951. Au cours de cette série de mesures, le creuset a été sorti et ouvert à trois reprises pour se rendre compte de son état et pour éprouver la reproductibilité des réglages et des mesures.

LUMINANCE DU CORPS NOIR EN BOUGIES INTERNATIONALES PAR CM²

Ordre des paliers de solidification	Luminance en b.int/cm ²	Lames étalons de référence	Ordre des paliers de solidification	Luminance en b.int/cm ²	Lampes étalons de référence
1	58,87	C. 69	18	58,78	
2	58,73	C. 70	19	58,61	C. 11
3	59,11	et	20	58,79	C. 12
4	58,83	C. 71	21	58,83	et
5	58,91		22	58,60	M. 13
6	58,76		23	58,84	
7	58,67		24	58,59	
8	59,00				
9	58,88	L. 19	25	58,77	
10	58,92	M. 12	26	58,84	L. 19
11	58,93	et	27	58,96	M. 12
12	58,79	M. 23	28	59,11	et
13	58,91		29	58,86	M. 23
14	58,68		30	58,80	
15	58,87				
16	58,74				
17	58,57				

Moyenne : 58,82 ; écart maximum par rapport à cette moyenne : 0,6 %.

Chaque séance de travail comportait la détermination de la luminance du corps noir en fonction de l'intensité moyenne d'un groupe de trois lampes étalons, au cours de deux ou trois paliers de solidification. La luminance correspondant à chaque palier est inscrite dans le tableau précédent, ainsi que la désignation du groupe de trois lampes ayant servi aux comparaisons photométriques.

La valeur moyenne de la luminance du corps noir à la température de solidification du platine, exprimée en bougies internationales, d'après le groupe de lampes françaises, est 58,82.

Les valeurs obtenues peuvent différer entre elles de près de 1%. L'écart maximum par rapport à la valeur moyenne est de 0,6 %. Cette dispersion des résultats est due :

1°) aux comparaisons photométriques, qui sont homochromes dans le cas du corps noir (tare à 2 042° K), mais quelque peu hétérochromes dans le cas des lampes étalons ($\Delta T_c = 30$ à 35°) ;

2°) à la nature des lampes étalons à filament de carbone, vieilles de 30 ans pour la plupart, dont le filament est formé de deux boucles qui ne sont pas rigoureusement dans un plan.

Pour nous conformer aux spécifications du C. I. P. M., nous avons effectué nos mesures pendant la solidification du platine. Cependant, de nombreuses déterminations de luminance ont été faites au cours des « paliers » de fusion et nous avons toujours obtenu des valeurs légèrement plus faibles (0,3 à 0,6 %) que celles obtenues au cours des paliers de solidification, ce qui correspond à une différence de l'ordre du degré.

Les résultats obtenus au point de solidification sont plus constants, à condition toutefois d'éviter de produire une surfusion trop importante et de surveiller avec attention l'énergie fournie à l'enroulement du four, afin de remédier rapidement aux variations du secteur qui perturberaient la petite quantité d'énergie employée à retarder le processus naturel du refroidissement.

La concordance au point de solidification peut s'expliquer, semble-t-il, par le brassage électromagnétique du liquide qui tendrait à favoriser l'uniformité de température à l'attaque de la solidification. Nous avons observé, sur un lingot solidifié extrait de son creuset, la présence de cavités dans le corps du métal contre la paroi même du tube, causant ainsi une non-uniformité de température à la fusion. De plus, il se forme presque toujours une croûte plus ou moins continue adhérent à la partie supérieure du creuset ou du tube, et séparée du reste du lingot par l'effet de contraction à la solidification.

Ajoutons enfin que le chauffage, pour atteindre la première fusion au début de chaque séance de travail, s'effectuait lentement (environ 1 heure) et que les mesures n'étaient réellement entreprises qu'à partir du deuxième palier de solidification.

Précision. — L'incertitude dont est entachée la valeur de la luminance du corps noir indiquée ci-dessus est la résultante des incertitudes avec lesquelles sont connus d'une part le facteur de transmission du système prisme-lentille (2/1 000) et d'autre part les mesures géométriques des diverses distances D , D_E , D_t , D'_t et de l'aire A du diaphragme (soit $\frac{0,8 \times 2}{1\,000} = \frac{1,6}{1\,000}$). A cela s'ajoute l'erreur des pointés photométriques que l'examen du graphique des positions moyennes de la lampe tare sur un ensemble de 26 paliers de solidification permet d'estimer à 2,5/1 000. La valeur de la luminance est donc :

58,82 bougies int/cm²; incertitude 0,6 %.

Ce résultat concorde avec celui obtenu par le Professeur Ribaud et Mr Jouaust en 1933 au cours d'expériences réalisées dans le Laboratoire de Pyrométrie de l'Institut de Physique de Strasbourg, avec des creusets fournis par le N. B. S. et du platine purifié par *Heraeus*. Une première série de mesures photométriques (24 paliers) a fourni à Mr Ribaud la moyenne 58,79 alors que la seconde série (10 paliers) exécutée par MM. Jouaust et Waguët, a fourni 58,74. Les étalons de référence provenaient du Laboratoire Central d'Electricité (L. C. E.) et du N. B. S. Les comparaisons internationales de 1931-1932 des lampes à filament de carbone conservant la bougie internationale avaient conduit au rapport des unités : L. C. E./N. B. S. = 0,997.

Un nouveau lingot de platine est actuellement en cours de purification. Un second corps noir sera préparé et associé à un nouveau système prisme-lentille afin d'étudier la reproductibilité de l'étalon primaire et de rechercher les aménagements propres à augmenter la précision des mesures.

2. **Conservation de la candela.** — Bien que le recours à l'étalon primaire en vue de la confirmation de l'unité fondamentale soit relativement aisé, il convient de laisser subsister les lampes à incandescence comme étalons pratiques dans les laboratoires photométriques. Elles servent à conserver l'unité pendant les périodes s'écoulant entre les déterminations nouvelles par l'étalon primaire et constituent en outre le seul moyen pratique de transporter les valeurs pour la comparaison des différentes déterminations primaires.

Un groupe de 6 lampes à filament de carbone fut étalonné par comparaison directe au corps noir comme il a été décrit précédemment. La valeur attribuée à chaque lampe se calcule à partir des données expérimentales par la formule

$$I = 60 AT \left[\frac{D_R}{D} \times \frac{D_t}{D_t'} \right]^2$$

V. — L'ÉCHELLE PHOTOMÉTRIQUE AU LABORATOIRE D'ESSAIS

La réalisation de l'échelle photométrique comprend la réalisation de l'étalon primaire et la préparation d'étalons secondaires.

L'étalon primaire de lumière. — C'est le radiateur intégral fonctionnant à la température de solidification du platine pur, tel que nous venons de le décrire. L'unité photométrique fondamentale d'intensité lumineuse internationalement agréée, la candela, est définie comme le soixantième de l'intensité lumineuse par centimètre carré de l'étalon primaire.

Préparation d'étalons secondaires. — A) *Etalons secondaires d'intensité lumineuse à la température de couleur de l'étalon primaire (2 042° K).* Ils forment un groupe de lampes à filament de carbone dont l'intensité lumineuse est mesurée par comparaison photométrique directe à l'étalon primaire. D'autres lampes du même type sont étalonnées par comparaison aux lampes de ce groupe. Aucune différence de couleur n'intervient dans cette comparaison dont la précision est plus élevée (2 millièmes) que la précision avec laquelle on peut reproduire actuellement l'étalon primaire.

La valeur moyenne de l'intensité lumineuse de chaque lampe est 16 candelas.

B) *Etalons secondaires d'intensité lumineuse à la température de couleur 2 353° K.* Ils sont constitués par des lampes à filament de tungstène disposé en « dents de scie » dans un plan à l'intérieur d'une ampoule vide d'air. Ces lampes sont étalonnées par comparaison aux étalons du groupe A. La différence de couleur est pratiquement éliminée en interposant un filtre en verre bleu (filtre international R.2.28) entre le photomètre et l'étalon à 2 042° K. Le facteur de transmission de ce filtre pour le rayonnement émis par l'étalon à 2 042° K est déterminé à partir

de sa courbe de transmission spectrale (établie en 1933 dans les quatre grands laboratoires nationaux) et des efficacités lumineuses relatives adoptées en 1933 par le C. I. P. M.

La valeur moyenne de l'intensité lumineuse de chaque étalon est 30 candelas.

C) *Étalons secondaires de flux lumineux à la température de couleur de 2 353° K.* Ce sont des lampes à filament de tungstène dans le vide. Dans le premier type, le filament est disposé en « cage d'écureuil ». Dans le second type, le filament unique spiralé est disposé en forme de circonférence (diamètre 22 millimètres).

La distribution du flux lumineux étudiée par une méthode photoélectrique conduit à la connaissance du facteur de réduction sphérique. La détermination, par comparaison visuelle à certains étalons du groupe B, de l'intensité lumineuse dans un certain nombre de directions choisies, fournit tous les éléments du calcul du flux lumineux total. Le flux des lampes du 1^{er} type est 240 lumens, tandis que celui des lampes du 2^e type est 350 lumens.

D) *Étalons secondaires de flux lumineux à la température de couleur de 2 788° K.* Ce sont des lampes à filaments spiralés de tungstène disposés en zigzags dans une ampoule à atmosphère gazeuse. Elles sont étalonnées par comparaison aux étalons C du 2^e type, en utilisant l'intégrateur sphérique (diamètre 2 mètres), le verre bleu R.2.28, et tenant compte de la sélectivité de l'intégrateur préalablement déterminée.

Le flux de ces étalons est 2 100 lumens.

Ainsi, chaque Laboratoire National, se basant sur son propre étalon primaire de lumière, dérive ses étalons secondaires d'intensité lumineuse et de flux lumineux par son propre système de comparaisons photométriques. Il s'ensuit que les valeurs des unités, la candela et le lumen, obtenues comme résultat des comparaisons internationales organisées par le Bureau International des Poids et Mesures, doivent être, à un très haut degré, indépendantes de toutes erreurs systématiques qui pourraient être inhérentes à l'échelle photométrique établie par une seule méthode dans un laboratoire déterminé.

Le présent travail, entièrement exécuté à la Section de Métrologie du Laboratoire d'Essais, est publié avec l'autorisation du Directeur du Laboratoire.

Manuscrit reçu le 15 mai 1952.



