

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 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)
VOLUME TÉLÉCHARGÉ	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)

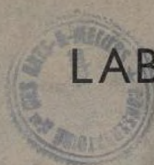
	N° 123 (1948)
	N° 124 (1948)
	N° 125 (1948)
	N° 126 (1948)
	N° 127 (1948)
	N° 128 (1948)
	N° 129 (1948)
	N° 130 (1949)
	N° 131 (1949)
	N° 132 (1949)
	N° 133 (1948)
	N° 134 (1949)
	N° 135 (1948)
	N° 136 (1949)
	N° 137 (1950)
	N° 138 (1950)
	N° 139 (1950)
	N° 140 (1950)
	N° 141 (1950)
	N° 142 (1948)
	N° 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)
	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°36 (1938)
Adresse	Paris : Conservatoire national des arts et métiers, 1938
Collation	1 vol. (7 p.) : ill. ; 33 cm
Nombre de vues	12
Cote	CNAM-BIB P 1329-B (12)
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.12

...

P 1329-B

8° Km. 107. (13)



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

LABORATOIRE D'ESSAIS



LA MESURE DE HAUTE PRÉCISION ET LES BESOINS DE L'INDUSTRIE MODERNE

LE LABORATOIRE D'ESSAIS DU
CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS

par G. A. Boutry

PUBLICATION N° 36

*(Extrait de « La Technique
Moderne » 15 Juin 1938)*



MÉTROLOGIE

LA MESURE DE HAUTE PRÉCISION
ET LES BESOINS DE L'INDUSTRIE MODERNE

LE LABORATOIRE D'ESSAIS DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

C'est une chose banale de dire aujourd'hui le los de l'industrie moderne et la course à la précision que l'on a instituée dans tous ses domaines. Chacun sait que l'industrie mécanique, l'ajustage, atteignent ou vont atteindre à des incertitudes dont l'extrême petitesse est d'ailleurs imposée d'une façon rigoureuse par l'usage auquel seront soumises les pièces à construire : du moteur d'automobile jusqu'à la technique du vide en passant par les multiples instruments nécessités par la Défense Nationale, l'ajustage le plus rigoureux est imposé.

On sait un peu moins que la même précision extrême envahit peu à peu tous les domaines industriels. Dans la mesure des temps, les horlogers et les constructeurs de chronomètres avaient atteint depuis longtemps des précisions très bonnes dans la mesure des longues durées, et cela paraissait suffisant. Il a fallu, dans ces dernières années, apprendre à mesurer, avec des approximations atteignant le millionième, des temps extrêmement courts ; en particulier, c'est le problème de l'interconnexion des réseaux de distribution électrique qui a entraîné la nécessité pour l'ingénieur de synchroniser ceux-ci avec une très grande exactitude ⁽¹⁾. De telles remarques ont un caractère absolument général. Dans les vingt dernières années, l'industrie métallurgique s'est rendu un compte exact de l'influence de très faibles quantités d'impuretés sur les propriétés mécaniques, physiques et électriques des alliages qu'elle fabrique ⁽²⁾ ; la préparation d'alliages métallurgiques de plus en plus constants et de plus en plus purs a entraîné l'augmentation de la finesse des méthodes d'analyses, a généralisé l'emploi des microbalances et, par contre-coup, a nécessité un étalonnage plus précis et plus fin des masses et des boîtes de poids utilisées.

Il n'est pas question dans cet article d'examiner les conséquences industrielles de cet état de choses : nous voudrions seulement montrer que ces faits ont eu, dans le domaine technique et dans le domaine scientifique, des répercussions d'ordre national qu'il n'est plus permis d'ignorer. Admettre que l'usine et l'atelier ont maintenant besoin d'appareils de mesure capables d'une extrême précision, c'est évidemment admettre en même temps la nécessité de contrôler ou de vérifier périodiquement le fonctionnement et les propriétés de ces appareils. Cela suppose qu'il existe, dans la nation, un organisme capable de réaliser des étalons de mesure définis sans ambiguïté avec une précision supérieure à l'incertitude la plus petite de la mesure industrielle ; cela suppose aussi que cet organisme dispose, pour rapporter les résultats donnés par les appareils à contrôle à ces étalons, de méthodes de mesure qui garantissent une précision supérieure à celle dont sont capables les appareils à vérifier eux-mêmes. Dans tout service de contrôle d'usine, l'instrument fondamental utilisé devra périodiquement être comparé aux appareils plus précis de cet organisme national.

On devine qu'un tel laboratoire central doit disposer d'une puissance d'outillage, de personnel et de moyens techniques telle qu'il serait ruineux de la concevoir en plusieurs exemplaires dans une même nation. C'est ce qui a été bien compris, et depuis d'assez longues années, par un grand nombre de pays dont le progrès industriel se fait à une cadence particulièrement rapide. C'est ainsi que les Etats-Unis d'Amérique disposent du Bureau of Standards, l'Angleterre du National Physical Laboratory, l'Allemagne du Physikalisch-Technische Reichsanstalt, le doyen de ces institutions, puisque sa fondation date de 1880.

Voyons ce qui a été fait en France : notre pays possède, depuis 1902, un Laboratoire d'Essais Mécaniques, Physiques et Chimiques dans les attributions duquel rentrent ces vérifications des instruments de mesure et des produits industriels qui paraissent si fondamentales et si nécessaires aux progrès techniques. L'importance nouvelle qui s'attache à cette partie de sa mission a été bien mise en lumière lorsqu'en 1936 il a été chargé de la conservation des étalons nationaux du système métrique, de la réalisation d'étalons secondaires et, d'une façon générale, de toutes études ou recherches destinées à l'amélioration de la précision dans les méthodes de mesure en général. Il a poursuivi l'établissement de services nouveaux dotés d'un matériel moderne bien souvent spécialement construit par ses soins ou sur ses indications ; nous avons pensé qu'une description rapide des moyens de travail de ces sections nouvelles serait utile aux industriels. Nous examinons donc, dans l'article ci-dessous, le service des mesures de températures, les salles thermostatiques, les salles de mesure des longueurs et le service de mesure des masses, nous réservant de décrire ultérieurement les services de pyrométrie et de photométrie.

(1) Voir *La Technique Moderne*, t. XXVIII, n° 4 (15 février 1936), p. 136 ; t. XXIX, n° 4 (15 février 1937), p. 99.

(2) Voir *La Technique Moderne*, t. XXX, n° 7 (1^{er} avril 1938), supplément.

Le service des mesures des températures.

Un principe, toujours admis, rarement explicité, parfois incompris dans certaines de ses conséquences, domine la science des mesures de haute précision : les dimensions des objets

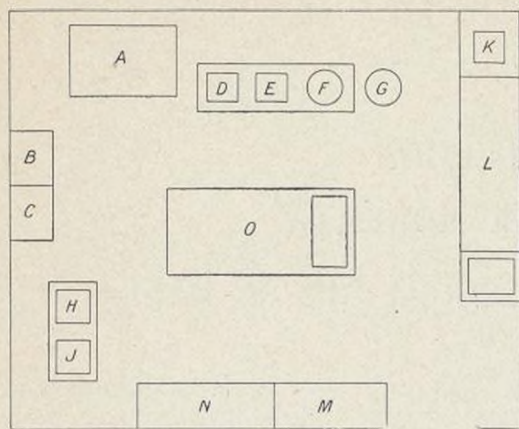


Fig. 1. — Plan de la salle de thermométrie.

A, Table de soufflage; — B, Machine à calibrer; — C, Machine à diviser; — D, E, Thermostats à eau (le second de grand modèle); — F, Hypsomètre ordinaire; — G, Hypsomètre basculant de Chappuis; — H, Thermostat à bain d'huile; — J, Thermostat à bain de nitrates; — K, Appareil à bain de soufre; — L, Paillasse et évier; — M, Armoire-vitrine; — N, Appareil à oxygène liquide; — O, Table avec armoire de classement des étalons.

matériels ne sont définies avec rigueur que si ces objets sont en équilibre énergétique complet avec le milieu qui les entoure; l'équilibre thermique est, on le sait, particulièrement difficile à obtenir; cela revient à dire que la température est la plus universelle et la plus gênante des variables; lorsqu'elle n'est pas constante, ni les mesures de longueurs, ni les pesées, ni les mesures de temps ne peuvent donner de résultats sûrs; lorsqu'elle n'est point définie avec une rigueur suffisante, les résultats des diverses séries de mesures cessent d'être comparables entre eux. On ne s'étonnera donc point de voir, au Laboratoire d'Essais, la grandeur température traitée avec des égards particuliers.

Tout un service est consacré à la réalisation et à la définition précise d'une échelle fondamentale de température; toute une

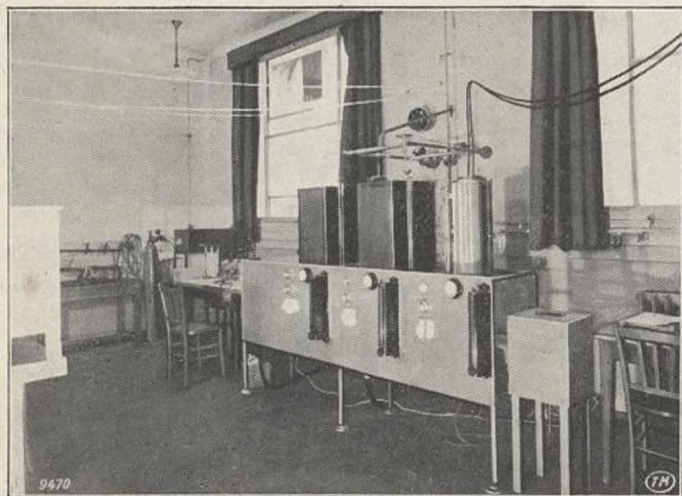


Fig. 2. — Vue de la salle de thermométrie.

installation, quasi-industrielle, est destinée à maintenir constante la température des principales salles de mesure.

On sait que la loi française a choisi, comme échelle légale des températures, l'échelle que définirait un thermomètre à gaz parfait. Qu'il ne soit pas possible de construire un tel instrument n'empêche nullement de définir l'échelle, puisque nous savons

évaluer l'écart entre les échelles définies par des thermomètres à hydrogène, à azote, à hélium, et l'échelle légale : le thermomètre à gaz est, et restera longtemps, l'instrument de référence dans les mesures de température.

Malheureusement, cet appareil fondamental n'est pas d'un usage rapide et aisé. C'est la raison pour laquelle la vérification des instruments se fait le plus souvent en fonction d'une autre échelle, l'échelle internationale des températures : les appareils qui permettent de réaliser celle-ci sont d'un usage plus souple et permettent d'atteindre dans les mesures une finesse au moins égale à celle dont est capable le meilleur thermomètre à gaz.

Trois salles, au Laboratoire d'Essais, sont réservées à la réalisation de cette échelle de températures. La première (fig. 1) réunit les thermostats et les appareils d'intercomparaison utilisés dans l'intervalle $-190^{\circ}\text{C} + 660^{\circ}\text{C}$. On distingue la plupart d'entre eux sur la figure 2. La température fixe la plus basse est réalisée par ébullition de l'oxygène liquide pur sous une pression voisine de l'atmosphère. L'oxygène nécessaire est préparé par décomposition dans le vide du permanganate de potassium contenu dans le tube C (fig. 3), liquéfié dans le

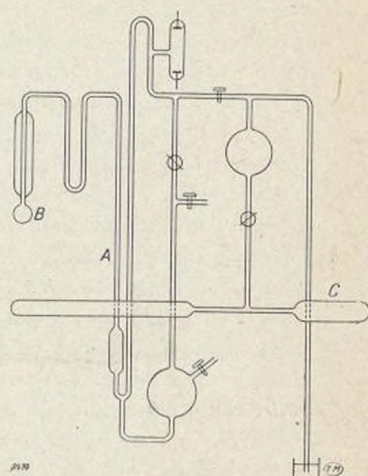


Fig. 3. — Appareil servant à définir le repère thermométrique -190° (température d'ébullition de l'oxygène).

petit ballon B, refroidi par immersion dans l'air liquide; sa pression de vapeur à tout instant est alors mesurée par le mano-baromètre A et fixe la température du système univariant ainsi réalisé (1); le thermomètre à étudier est placé dans le voisinage immédiat du ballon B et plonge dans le même mélange réfrigérant que lui.

Rien de bien nouveau n'existe dans les appareils destinés à définir les repères thermométriques 0° et 100°C . Le premier, simple et vaste vase Dewar, contient de la glace d'eau distillée aérée, finement râpée et mouillée. On pousse le souci de la précision jusqu'à préparer spécialement cette glace dans des moules d'acier inoxydable et jusqu'à mesurer la conductivité électrolytique de l'eau de fusion qu'elle fournit, afin d'appliquer à la température de fusion théorique une correction, d'ailleurs très minime, et dont la loi de Raoult permet de calculer l'ordre de grandeur. Le second n'est autre que l'appareil de Chappuis décrit dans tous les traités de physique, doté d'un chauffage électrique monté avec un régulateur de tension et construit de façon à diminuer les soubresauts parfois violents qui, dans l'appareil habituel, nuisent à la constance de la température d'ébullition de l'eau (fig. 4). Un bain de vapeur de soufre du type classique définit la température 444°C qui constitue le repère thermométrique fondamental le plus élevé que l'on utilise pour le calibrage du thermomètre à résistance de platine qui définit cette partie de l'échelle.

Cet ensemble est complété par une batterie de thermostats de température ajustable destinés à comparer, à toute température, les étalons du Laboratoire avec les thermomètres dont le contrôle est demandé. Le principe de la construction de ces appareils mérite d'être décrit succinctement : deux cylindres

(1) La relation $t_p = t_{760} + 0,0126 (p - 760) + 0,0000065 (p - 760)^2$ définit cette température.

circulaires de cuivre rouge, verticaux et parallèles A et B (fig. 5), sont reliés ensemble par deux manchons horizontaux de section rectangulaire. Le cylindre A constitue la chambre de mesure; le cylindre B contient une batterie de résistances chauffantes et un agitateur; la construction des résistances est un peu particulière. Le but à atteindre était de dissiper, dans des éléments de faible capacité calorifique, des puissances importantes. On y est parvenu en bobinant des rubans de nichrome sur des plaquettes de mica de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur; l'élément ainsi réalisé est isolé par d'autres plaquettes de mica et inséré à l'intérieur d'un tube de cuivre rouge sans soudure, ayant une épaisseur d'environ 2/10 de millimètre et dont la section rectangulaire est très étroite. On obtient ainsi des éléments ayant une longueur de l'ordre de 15 cm, une largeur

d'environ 3 cm et une épaisseur à peine supérieure au millimètre, très légers, et capables de dissiper 500 w. L'agitateur situé au-dessus de la batterie chauffante est une hélice dont l'axe est porté par un bâti qui n'a aucun point commun avec le bâti qui supporte le thermostat. De cette manière, les vibrations parasites sont éliminées.

L'ensemble du thermostat est

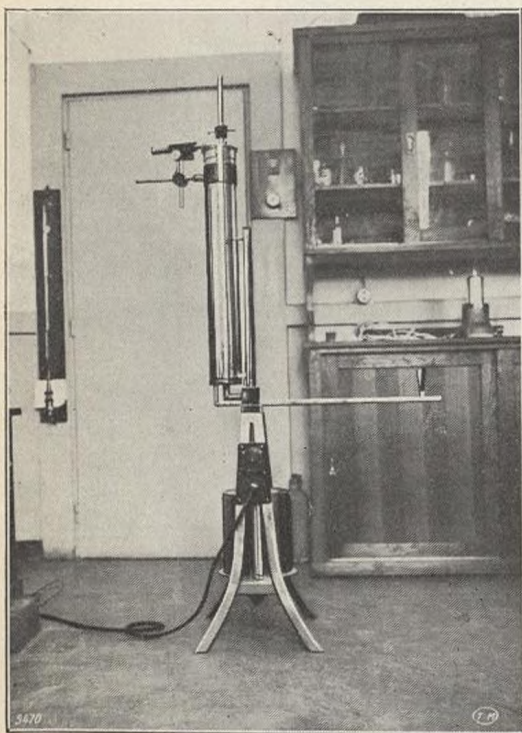


FIG. 4. — Appareil de Chappuis perfectionné, pour la détermination du point + 100°.

soigneusement calorifugé à la soie de verre. Le fonctionnement de ces appareils est très remarquable. La figure 6, qui donne un exemple des courbes de chauffage et de refroidissement, montre à quel point l'inertie est faible; on y voit également que l'isolement thermique est assez bon pour que, jusqu'à des températures de l'ordre de 95°, la courbe de chauffage reste très approximativement une droite.

Ces thermostats sont utilisés par le Laboratoire de deux manières :

1° Lorsqu'on désire réaliser, dans un domaine déterminé de la chambre de mesure, une température se maintenant constante pendant un temps plus ou moins long, un courant constant et faible est envoyé dans la résistance de chauffage; il est possible de cette manière, à condition d'utiliser comme source de courant une batterie d'accumulateurs, de réaliser des « paliers » au cours desquels la température en un point de la chambre de mesure reste constante à mieux que 1/10 de degré près pendant plusieurs heures.

Par contre, avec cette méthode d'utilisation, il existe dans la chambre de mesure A un léger gradient vertical de température atteignant, pour une température de l'ordre de 50°, quelques

centièmes de degré pour 25 cm; il est évident qu'il ne saurait en être autrement, puisque la batterie chauffante fournit un peu d'énergie.

2° Si l'on veut obtenir que tous les points de la chambre de mesure A soient, à un instant donné, aussi exactement que possible à la même température, après avoir chauffé le thermostat à la température maximum d'emploi, le courant est coupé et l'on maintient une agitation lente; la température de la chambre de mesure, qui reste partout la même à mieux que 1/100 de degré près à un instant donné, décroît lentement avec le temps (à 90°, par exemple, la chute est de 5 à 6/100 de degré par minute).

Le Laboratoire possède deux thermostats à eau de ce type, qui fonctionnent entre 0° et 100°; un thermostat à huile de même construction permet d'atteindre une température supérieure à 250°; un dernier thermostat permet, en utilisant un mélange de nitrates alcalins fondus, d'atteindre une température de 500°.

La salle adjacente contient les fours utilisés pour la réalisation de l'échelle entre les températures de 600° et de 1 063° C; il y en a quatre. Trois, maintenus aux températures constantes de la fusion de l'antimoine (630° C), de l'argent (960° C) et de l'or (1063° C), définissent les repères thermométriques fondamentaux. La construction en a été assez malaisée, à cause de la nécessité dans laquelle on se trouvait de réaliser, à des températures de l'ordre

de 1000° C, un domaine d'un volume de l'ordre de 100 cm³ dans lequel la température doit être définie à 0,001 près. De multiples précautions furent prises pour y parvenir; le métal est fondu dans un creuset de silice pure entouré d'un second creuset en nickel épais qui joue le rôle de jaquette thermostatique (fig. 7). Un enroulement annulaire C,

posé sur la face supérieure du second creuset, permet de compenser les pertes de chaleur par convection vers le haut du four. Le couple à étalonner descend dans la chemise A, scellée au couvercle du creuset. Le vide peut être fait et maintenu par le tube B. Enfin, deux thermo-couples montent ou descendent dans les trous D, D', et permettent l'étude de la répartition des températures dans le creuset de nickel. Ces appareils, dont l'étude est en cours, semblent pouvoir permettre la définition d'une température de fusion à mieux que 0,001 C près.

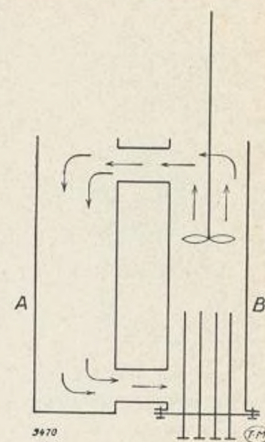


FIG. 5. — Schéma d'un thermostat.

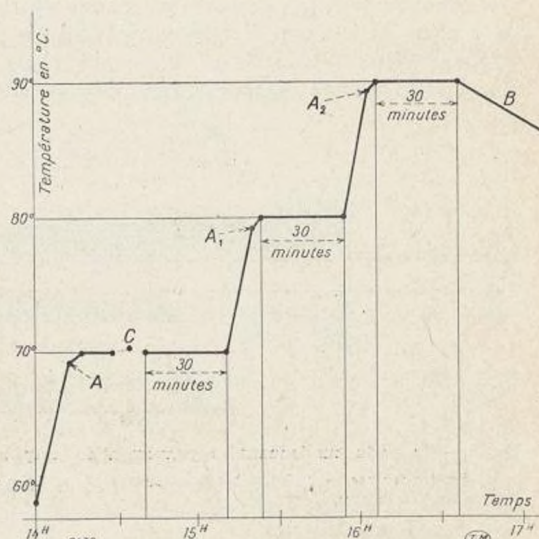


FIG. 6. — Courbes de chauffage et de refroidissement d'un petit thermostat.

A, A₁, A₂, Coupures du circuit principal; — B, Refroidissement après coupure totale; — C, Réglage.

Dans ce domaine, l'échelle internationale des températures est définie non plus par la résistance d'un enroulement de fil de platine, mais bien par la force électromotrice développée par un thermocouple formé d'un fil de platine pur soudé à un fil de platine allié à 10 % de rhodium. Les trois fours qui viennent d'être décrits servent au calibrage du thermocouple étalon. Le quatrième four, à température ajustable, joue le rôle de thermostat d'intercomparaison entre les couples étalons et les

thermomètres à contrôler. Ce four n'est autre que le corps noir au point de fusion de l'or que M. P. Fleury avait décrit dans sa thèse (fig. 8). La présence de trois enroulements de chauffage distincts, dont deux jouent le rôle d'anneaux de garde, permet de réaliser dans la chambre centrale des températures remarquablement constantes. De plus, la construction de ce four permet d'étudier le rayonnement qu'il émet, ce qui donne la possibilité de réaliser une jonction entre le domaine 600°-1063° C, où la température est définie par un couple, et le domaine situé au-dessus de 1063° C, où la température est désormais définie par des pointes pyrométriques. Nous ne dirons rien, dans cet article, de la réalisation de cette partie de l'échelle internationale des températures.

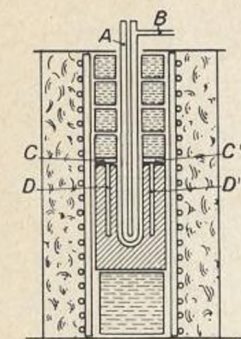


Fig. 7. — Coupe d'un four à température constante.

Il ne suffit pas d'être en mesure de réaliser des températures aussi constantes et aussi bien définies que possible; il faut encore définir sans ambiguïté les propriétés des étalons thermométriques placés dans les thermostats qui viennent d'être décrits : la troisième salle du service contient les appareils destinés à mesurer à tout instant la résistance électrique du thermomètre à fil de platine et la force électromotrice des couples thermoélectriques étalons. Cette salle est souterraine et maintenue, par des procédés dont nous dirons quelques mots dans la suite, à tempé-

ture constante. De cette manière, les résistances du pont et du potentiomètre utilisés pour ces mesures restent bien constantes, ce qui dispense d'appliquer des corrections incommodes et pas toujours très précises. On voit donc que les opérateurs à qui sont confiées ces mesures travaillent en aveugles, et seraient complètement isolés de leurs aides qui surveillent les thermostats dans lesquels sont plongés les instruments à étudier si une installation de microphones et de hauts-parleurs, visibles sur la figure 2, ne réalisait une liaison commode. C'est dans une publication ultérieure que nous décrirons le pont de mesure utilisé, qui comporte un grand nombre de dispositions nouvelles. Il nous suffira ici de signaler qu'il permet la définition d'une résistance thermométrique avec six chiffres significatifs exacts, ce qui permet d'atteindre le millième de degré Centigrade dans

l'intervalle 0°-100° C. Jusqu'à 600°, la précision, un peu moins bonne, atteint 0,005; au-dessus, et jusqu'à 1063° C, l'ensemble fourni par le couple étalon et son potentiomètre de mesure permet des mesures à quelques centièmes de degré près. Cette précision extrême est strictement nécessaire : l'étalonnage d'un thermomètre à 0,01 près est aujourd'hui exigé de façon courante, et c'est avec une précision au moins égale que l'on doit définir la température d'une barre d'acier de 1 m de long si l'on veut que sa longueur soit définie à quelques dixièmes de micron près.

Les salles thermostatiques.

Dans la mesure précise des longueurs et des masses, il est essentiel, comme nous l'avons dit, d'opérer à température très constante. Pour réaliser au mieux cette difficile condition, tout un sous-sol a été construit et aménagé spécialement (fig. 9). Chaque salle possède un double plafond et un double plancher. Le

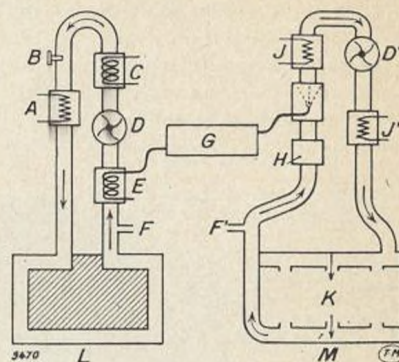


Fig. 9. — Schéma des salles thermostatiques.

A, J, J', Batteries de chauffe électrique; — B, Thermostat; — C, Batterie de chauffe à vapeur (hiver); — D, D', Ventilateurs; — E, Batterie réfrigérante (été); — F, F', Prises d'air; — G, Machine frigorifique; — H, Filtre; — K, Salle de mesures; — L, Circulation extérieure; — M, Circulation intérieure.

mur qui entoure le sous-sol et qui l'isole du terre-plein extérieur est double également, isolant ainsi une chemise d'air. Deux circulations d'air sont alors créées : la première, dite *circulation extérieure*, alimentée par le ventilateur D, parcourt en circuit fermé la chemise extérieure L et les batteries de chauffage et de refroidissement A, C, E, destinées à maintenir constante la température de l'air; ces dernières sont commandées par un thermomètre à bilame actionnant les relais dont l'un met en route les rhéostats de chauffage de A, alors que l'autre ouvre la vanne de E à un courant d'eau froide à 6° C provenant de la cuve G dans laquelle une machine frigorifique entretient cette température. Le sous-sol est ainsi entouré d'un matelas d'air qui le protège contre les perturbations thermiques d'origine extérieure.

Dans les salles mêmes, un second courant d'air (circulation intérieure) de faible vitesse suit un parcours plus compliqué; venant de l'extérieur, il est d'abord mélangé à l'air déjà utilisé, lavé dans une colonne où une pulvérisation d'eau froide provenant de la cuve G le débarrasse de son anhydride carbonique et le sature de vapeur d'eau, en l'amenant à la température de 6° C; filtré, il passe ensuite dans une batterie de chauffage qui l'amène

à 20° C sans changer la masse d'eau qu'il contient par mètre cube, ajustant ainsi son degré hygrométrique aux environs de 70 %.

Il est alors envoyé dans les salles de mesure où il entre par des orifices pratiqués dans le double plafond, orifices de section réglable permettant de parfaire une distribution constante de température en tous points. Des thermostats et un hygromètre contrôlent automatiquement l'ensemble de l'installation.

On réussit ainsi à maintenir dans les salles de mesure une température de 20° C, sans variations supérieures à 0,1 C. Il est à peine utile d'ajouter que, dans ces salles thermostatiques, un éclairage indirect spécial, destiné à éviter les échauffements locaux, doit être utilisé.

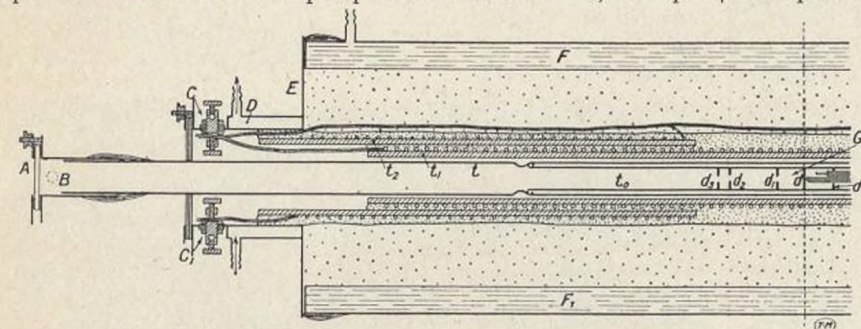


Fig. 8. — Coupe du four donnant le rayonnement du « corps noir », à la température de fusion de l'or.

A, Fenêtre de visée; — t_1 , Tube chauffant principal; — t_2 , Tube de garde; — F, F1, Water-jacket; — d_1, d_2, d_3 , Diaphragmes de visée.

à 20° C sans changer la masse d'eau qu'il contient par mètre cube, ajustant ainsi son degré hygrométrique aux environs de 70 %.

Les salles de mesure des longueurs.

Certaines de ces salles thermostatiques sont consacrées au Service de mesure des longueurs (fig. 10). En réalité, l'aspect général de la salle est un peu différent de celui que représente la figure, car, malgré la constance de la température de l'atmosphère, chacune des machines de mesure est revêtue d'une carapace de bois et de liège destinée à la soustraire complètement aux échauffements locaux inévitablement provoqués par la présence des observateurs durant les mesures. Chacun de ceux-ci représente, en effet, quand il est placé dans une atmosphère à la température de 20°, un dégagement de chaleur de l'ordre de 100 grandes calories par heure, dont les deux tiers sont dissipés par conduction, convection et rayonnement (le reste est à mettre au crédit de l'expiration).

En principe, et à condition que la position de l'observateur

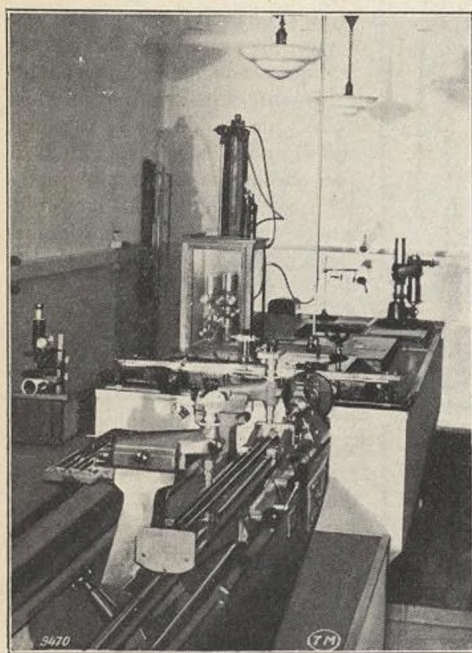


FIG. 10. — Vue partielle d'une salle de mesure des longueurs.

soit parfaitement connue, il serait possible de compenser ces influences et d'annuler leur effet à l'aide de sources auxiliaires (réservoir d'eau chaude, etc...). En pratique, une telle technique s'avère de mise au point très difficile, car les observateurs se déplacent sans cesse et chacun d'eux ne dégage pas la même quantité de chaleur. De même, ces enceintes de protection maintiennent la masse des machines dans l'obscurité,

avantage supplémentaire quand on cherche à assurer une grande constance de température.

Il existe, on le sait, deux catégories de longueurs actuellement en usage dans les services métrologiques : les étalons à traits et les étalons à bouts. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients : la longueur de l'étalon à traits, étant définie par la distance qui sépare deux traits tracés à l'aide d'une pointe de diamant sur une surface spéculairement polie, peut être pointée et repérée à l'aide de procédés d'optique géométrique pure, sans qu'il soit nécessaire d'exercer sur l'étalon de longueur aucun contact ou aucune action directe; l'intercomparaison de deux étalons à traits, qui se fait sur un comparateur à déplacement latéral, utilisera le même principe, chacun des étalons défilant tour à tour sous deux microscopes dont les axes optiques, parallèles, sont maintenus à distance fixe l'un de l'autre.

Pendant longtemps, on a pensé que l'étalon à bouts ne pouvait être utilisé qu'entre deux palpeurs qui, appuyant sur ses deux extrémités, définissaient la longueur qu'il représente; si cela était toujours le cas, on conçoit que l'étalon à bouts puisse

être considéré au point de vue métrologique comme inférieur à l'étalon à traits : il est évident que le résultat de la mesure dépendra essentiellement de l'effort exercé par les palpeurs sur l'étalon étudié; des variations de l'ordre de quelques microns interviennent en général lorsque les palpeurs exercent sur l'objet serré des efforts de l'ordre du kilogramme; il n'est pas possible de préciser davantage, car les effets sont très variables suivant la forme des palpeurs (plans ou sphériques) et suivant la forme des objets mesurés.

Quoi qu'il en soit, l'étalon à bouts présente une importance industrielle bien supérieure à l'étalon à traits. Le contrôle des fabrications en usine s'effectue à peu près toujours à l'aide de calibres, tampons, broches à bouts plans ou sphériques, cales, etc., qui sont tous des étalons à bouts. On conçoit donc que, pour un service désireux d'établir la jonction nécessaire entre la technique des mesures de haute précision et l'industrie, le problème fondamental consiste dans la comparaison d'étalons à bouts et d'étalons à traits de même longueur : en effet, l'étalon légal en France est un mètre à bouts établi par le Bureau international des Poids et Mesures et déposé, depuis 1936, dans les coffres du Laboratoire d'Essais.

C'est pourquoi l'instrument fondamental du Service de Mesure des Longueurs est la machine à mesurer à déplacement longitudinal. Il serait oiseux de décrire longuement ici un instrument de travail classique, qui est utilisé à la fois pour la solution du problème que nous venons de poser et pour la vérification des subdivisions du mètre. Nous pensons qu'il vaut mieux, pour montrer à quelle minutie on doit s'astreindre lorsque l'on cherche à obtenir dans la mesure d'une longueur la plus haute précision actuellement possible, consacrer quelques lignes à la description de l'étalonnage d'un mètre de référence.

Ces étalons secondaires sont constitués en général par une règle de section en H (fig. 11), en invar, divisée dans le plan de la fibre neutre, plan qui a reçu préalablement un poli spéculaire. L'opération débute par la comparaison, au comparateur à déplacement latéral, de ce mètre avec l'un des étalons du Laboratoire, afin de déterminer sa longueur totale avec une incertitude de 2 à 3/10^e de micron. Le mètre est ensuite porté sur la machine à mesurer et on procède à la mesure des distances comprises entre ses divisions. Pour effectuer cette opération, les deux microscopes de la machine sont amenés côte à côte, de façon que l'axe optique du premier passe par le trait zéro, alors que l'axe optique du second passe par le trait 10 cm de la règle à étudier. Ce réglage effectué, l'opérateur fait glisser le chariot qui porte la règle de façon à pointer les traits 10 et 20 cm. Comme la longueur du deuxième décimètre n'est jamais exactement celle du premier, quand l'axe optique du microscope n° 1 coïncide avec le trait 10, il est impossible d'obtenir la coïncidence du deuxième axe optique avec le trait 20. La vis micrométrique du second microscope, qui a été préalablement étalonnée, permet de mesurer en dixièmes de micron la différence. On procède de même pour le 3^e, le 4^e, le 5^e..., le 10^e décimètre, et l'on obtient ainsi une première série de mesures. Il est évident que cette série de mesures est grevée d'erreurs accidentelles inévitables dont il s'agit de réduire l'influence; pour cela, on n'a rien trouvé de mieux, en métrologie, que de recommencer un grand nombre de fois les mesures, en faisant varier chaque fois les conditions expérimentales. Dans le cas qui nous occupe, on reviendra à la position initiale et, le microscope n° 1 étant de nouveau poussé sur le trait zéro, on déplacera le microscope n° 2 de façon à pointer le trait 20 cm.

Le glissement du chariot donnera maintenant une seconde

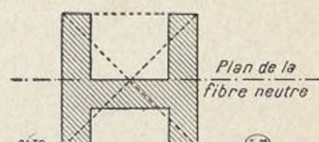


FIG. 11. — Section d'un étalon secondaire.

série de mesures, les longueurs comparées étant cette fois :

0 — 20
10 — 30
20 — 40
80 — 100

Si l'on amène les axes optiques à une distance de 30 cm, on

nombreuses fois, et l'ensemble des résultats est traité par la méthode des moindres carrés, afin de déterminer la valeur la plus probable de chacun des décimètres de la règle à étalonner, compte tenu de toutes les mesures qui auront été faites.

L'opération est ensuite recommencée d'une façon tout à fait semblable, centimètre par centimètre; il est inutile de remarquer que, dans cette seconde partie de l'étalonnage, le nombre des mesures est beaucoup plus élevé encore. A titre d'exemple, nous

donnons, sans y insister, le tableau des mesures et des calculs relatifs à l'étalonnage des décimètres d'une règle (fig. 12). Les nombres en caractères droits représentent les moyennes des résultats expérimentaux obtenus dans chaque série de mesures, en seconde ligne sont inscrites les valeurs probables des mêmes grandeurs; les nombres inscrits en italique au-dessous des précédents représentent les erreurs probables telles que les donne la méthode des moindres carrés. La valeur de l'ensemble des mesures se juge à l'ordre de grandeur et à la régularité de ces erreurs; quand les mesures sont bien exécutées, l'ordre de grandeur moyen de ces divergences n'atteint pas le micron.

Il est à peine besoin d'insister sur la durée de telles opérations; il faut dire pourtant qu'un seul étalonnage exécuté par un observateur unique ne suffit point; il faut le répéter et le confier à d'autres opérateurs, afin d'éliminer, autant que faire se peut, l'inévitable équation personnelle de chacun d'eux.

Heureusement, toutes les opérations effectuées au Service de Mesure des Longueurs ne sont pas aussi longues que ces délicates mesures fondamentales; la plupart du temps, de telles mesures ne sont exécutées que sur des jeux de calibres, des tampons, des broches, des règles appartenant aux laboratoires et qui deviennent des étalons secondaires définis avec une précision assez grande pour qu'une intercomparaison

LABORATOIRE D'ESSAIS
SECTION DES ÉTALONS NATIONAUX

FEUILLE DE CALCUL

Essai n° 87102 A
Date :
Calculateur : GM

	0/10	10/20	20/30	30/40	40/50	50/60	60/70	70/80	80/90	90/100
0/10		+ 15,4	+ 13,0	+ 11,6	+ 11,0	+ 13,6	+ 11,6	+ 2,5	+ 15,2	+ 11,6
10/20	- 15,35 - 15,4 0,05		- 2,0	- 3,6	- 5,1	- 4,4	- 4,7	- 12,6	+ 0,9	- 1,1
20/30	- 13,05 - 13,0 0,05	+ 2,30 + 2,0 0,30		- 0,9	- 3,0	- 1,6	- 1,3	- 10,7	+ 4,6	- 1,1
30/40	- 12,13 - 11,6 0,47	+ 3,22 + 3,6 0,38	+ 0,92 + 0,9 0,02		- 3,4	+ 0,1	0,0	- 10,5	+ 5,3	- 0,6
40/50	- 9,83 - 11,0 1,17	+ 5,52 + 5,1 0,42	+ 3,22 + 3,0 0,22	+ 2,30 + 3,4 1,10		+ 1,7	+ 1,9	- 8,5	+ 8,2	+ 3,4
50/60	- 11,82 - 13,6 1,72	+ 3,47 + 4,4 0,93	+ 1,17 + 1,6 0,43	+ 0,25 - 0,1 0,35	- 2,05 - 1,7 0,35		+ 1,2	- 9,7	+ 5,4	- 0,8
60/70	- 11,94 - 11,6 0,34	+ 3,41 + 4,7 1,29	+ 1,11 + 1,3 0,19	+ 0,19 0,0 0,19	- 2,11 - 1,9 0,21	- 0,06 - 1,2 1,14		- 10,5	+ 5,7	- 0,4
70/80	- 2,34 - 2,5 0,16	+ 13,01 + 12,6 0,41	+ 10,71 + 10,7 0,01	+ 9,79 + 10,5 0,71	+ 7,49 + 8,5 1,01	+ 9,54 + 9,7 0,16	+ 9,60 + 10,5 0,90		+ 14,8	+ 7,3
80/90	- 17,21 - 15,2 2,01	- 1,86 - 0,9 0,96	- 4,16 - 4,6 0,44	- 5,08 - 5,3 0,22	- 7,38 - 8,2 0,82	- 5,33 - 5,4 0,07	- 5,27 - 5,7 0,43	- 14,87 - 14,8 0,07		- 6,5
90/100	- 11,73 - 11,6 0,13	+ 3,62 + 1,1 2,52	+ 1,32 + 1,1 0,22	+ 0,40 + 0,6 0,20	- 1,90 - 3,4 1,50	+ 0,15 + 0,8 0,65	+ 0,21 + 0,4 0,19	- 9,30 - 7,3 2,09	+ 5,48 + 6,5 1,02	
Total	- 105,5	+ 48,0	+ 25,0	+ 15,8	- 7,2	+ 13,3	+ 13,9	- 82,1	+ 66,6	+ 11,8
Moyenne..	- 10,55	+ 4,80	+ 2,50	+ 1,58	- 0,72	+ 1,33	+ 1,39	- 8,21	+ 6,66	+ 1,18

FIG. 12. — Disposition d'une feuille de calcul relative à l'étalonnage d'un mètre étalon secondaire ($T = 20^\circ \pm 0,02$).

obtiendra une troisième série de pointés, les longueurs comparées étant :

0 — 30
10 — 40
20 — 50
70 — 100

et l'on continuera de même jusqu'à ce que, les deux microscopes étant désormais distants de 90 cm, une dernière série de mesures compare la longueur 0-90 à la longueur 10-100.

Il est évident que le nombre de pointés diminue dans chaque série; dans la première, il y en a 10; dans la dernière, il n'y en a plus que 2. Chacune des mesures est, on le pense, répétée de

simple et rapide des instruments étalonnés avec eux suffise. Dans ce dernier cas, les machines d'intercomparaison deviennent plus simples; on utilisera pour les broches, par exemple, le comparateur automatique Hartmann, instrument aujourd'hui classique, le comparateur à micromètre électrique ou, pour les petits diamètres, le micromètre pneumatique Solex, dont il a été question assez longuement dans les pages mêmes de cette Revue pour qu'il soit inutile d'insister ⁽¹⁾.

Nous avons dit plus haut qu'on avait admis pendant long-

(1) Voir *La Technique Moderne*, t. XXV, n° 4 (15 février 1933), p. 147; t. XXVI, n° 9 (1^{er} mai 1934), p. 294; n° 12 (15 juin 1934), p. 404.

temps que l'étalon à traits ne pouvait être mesuré avec précision que par des méthodes impliquant des actions mécaniques sur la surface de ses extrémités. On sait, depuis de longues années, que ce n'est point le cas; les mesures interférentielles sur des étalons à bouts plans, restées pendant longtemps du domaine de la haute métrologie, tendent de plus en plus à s'industrialiser. En dehors du grand interféromètre pour mesures absolues que décrivent MM. Perot et Fabry (on se souvient que c'est au Laboratoire d'Essais qu'une grande partie de ces mesures historiques furent exécutées, et la salle des collections du Laboratoire conserve avec piété l'instrument original qui fut utilisé à cette occasion), M. A. Perard a décrit un interféromètre imaginé par lui et qui permet très commodément la mesure absolue et rapide des cales étalons à bouts plans. De cet appareil dérivent des interféromètres industriels simplifiés (l'un d'eux est visible sur la

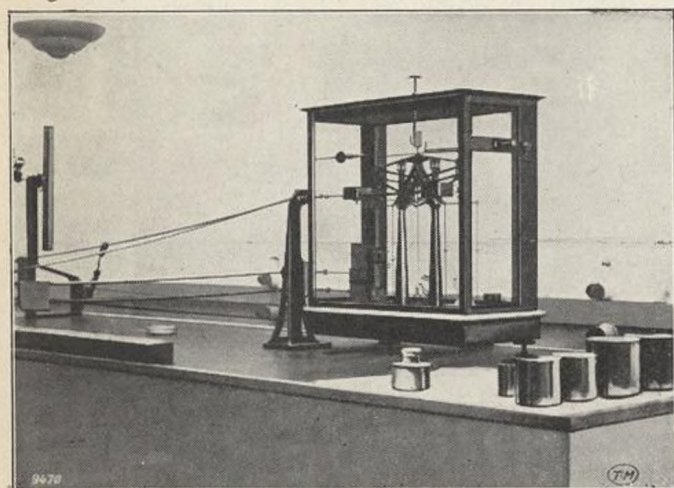


FIG. 13. — Balance Collot, pour la comparaison des masses étalons secondaires.

photographie de la figure 10) permettant l'intercomparaison de deux jeux de cales étalons. L'usage de ces instruments se généralise très rapidement.

Le service de mesure des masses.

Les méthodes utilisées pour les intercomparaisons des masses sont très semblables à celles qui viennent d'être mentionnées pour la mesure des longueurs. Nous ne parlerons guère des balances de précision ou des microbalances de type usuel, dont le Service de Mesure des Masses du Laboratoire d'Essais possède évidemment une série très complète; il est plus intéressant de donner une description rapide des deux balances de haute précision qui sont utilisées pour la comparaison, avec le kilogramme étalon national dont le Laboratoire est dépositaire, des étalons secondaires du Laboratoire. Ces derniers, conformément aux suggestions de M. Gosselin, ingénieur au Service des Poids et Mesures du Ministère du Commerce, sont constitués par des cylindres d'acier inoxydable amagnétique, de longueur égale au diamètre, soigneusement polis sur toute leur surface; l'ajustage final en est effectué à la machine à polir métallographique.

Les mesures sont effectuées sur deux balances capables de 1 kilogramme dans chaque plateau, la méthode de Borda étant utilisée avec la première balance et la méthode de Gauss avec la seconde. Toutes les manœuvres sont faites par commande à distance, sans que la cage de la balance soit ouverte au cours des mesures. Les figures 13 et 14 donnent des vues des deux balances utilisées. La plus ancienne, construite par Collot, est munie d'un mécanisme très simple qui dépose successivement dans le même plateau les deux masses à comparer. La seconde,

dont la construction vient d'être achevée par les Établissements Jouan et dont la réalisation mécanique est digne de tous les éloges, est d'une construction plus complexe: après la première pesée, les deux poids sont soulevés automatiquement, intervertis et déposés à nouveau sur les deux plateaux. Dans les deux cas, la lecture de la position d'équilibre se fait par autocollimation: le fléau de chaque balance porte un petit miroir plan devant lequel se trouve une lentille qui donne d'un spot lumineux une image au point sur une échelle divisée, elle-même fixée à 3 m de la balance sur le pupitre de commande. Ce qui importe, c'est la différence de position de ce spot entre les deux pesées; pour convertir ce résultat en termes de masse, il est nécessaire de connaître la sensibilité de la balance, et il est bon de mesurer cette sensibilité au cours de la pesée elle-même. C'est pourquoi, toujours automatiquement et une fois les mesures effectuées, le fléau de la balance peut être surchargé à gauche d'abord, puis à droite, d'une quantité de l'ordre du milligramme qui permet d'effectuer cette détermination.

L'ensemble qu'on vient de décrire succinctement permet d'approcher de très près la précision du $1/50^{\text{e}}$ de milligramme sur un kilogramme. Un tel résultat n'est pas obtenu sans peine: au cours des mesures, un aide-opérateur contrôle constamment la pression atmosphérique et la constance de la température de la salle; ces mesures accessoires sont nécessaires pour l'évaluation des corrections de poussée. Si l'on ajoute que la période d'oscillation de chacune des balances chargée est de l'ordre de la minute, et que leur amortissement est extrêmement faible (abandonnés à eux-mêmes dans l'obscurité, les fléaux s'immobilisent au bout d'un temps de l'ordre de trois heures), on aura une idée de la longueur et de la délicatesse d'un tel travail.

Tout cela, on s'en rend compte, ne constitue qu'un résumé vague et succinct de l'organisation des Services de Mesures de haute précision du Laboratoire d'Essais. La décrire complètement et mentionner les modes opératoires serait écrire un traité de métrologie; le résumé que nous venons de donner est lui-même incomplet, et nous avons passé sous silence les services au moins aussi importants de pyrométrie et de photométrie, dont l'installation est aujourd'hui terminée et qui sont dotés de l'un des plus grands bancs photométriques du monde (longueur totale 12 m). On a voulu seulement, dans ce court article, faire connaître au public industriel français le gros effort qui vient d'être accompli pour doter notre pays d'un laboratoire métrologique capable de concurrencer les grands laboratoires nationaux étrangers.

G.-A. BOUTRY.

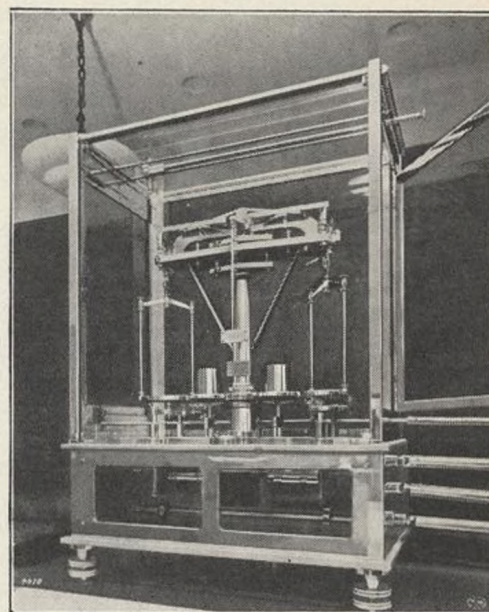


FIG. 14. — Balance Jouan, pour la comparaison des masses étalons secondaires.



