



HAL
open science

L'état actuel de la pyrométrie

H. Weiss

► **To cite this version:**

H. Weiss. L'état actuel de la pyrométrie. Journal de Physique et le Radium, 1921, 2 (2), pp.33-52.
10.1051/jphysrad:019210020203300 . jpa-00200778

HAL Id: jpa-00200778

<https://hal.science/jpa-00200778v1>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

LE RADIUM

L'ÉTAT ACTUEL DE LA PYROMÉTRIE

Par H. WEISS

Les raisons qui ont poussé à repérer les températures sont la nécessité de reconnaître avec précision une température déjà observée et le besoin de reproduire avec certitude cette température. Pour obtenir ces résultats, il faut se préoccuper de deux choses.

1. — Quel que soit le procédé de mesure employé, il faut observer la température toujours dans les mêmes conditions. Par exemple, quand il s'agit de connaître la température d'un corps que l'on chauffe, si, pour des raisons d'ordre technique, on ne peut observer la température du corps lui-même, on observera celle d'un point dont la loi de variation de température est liée d'une manière invariable et connue à celle du corps étudié. Le fait d'avoir négligé cette règle est la cause de nombreux désaccords entre les résultats d'un même observateur et surtout d'observateurs différents. Mais l'application du principe varie presque avec chaque cas particulier; c'est pourquoi les conditions étalons de mesure ne peuvent être fixées que dans certains cas spéciaux et n'ont pu faire l'objet d'une étude tout à fait générale.

2. — Une fois la mesure faite, il faut exprimer ses résultats au moyen d'une échelle que l'on puisse aisément retrouver soi-même et communiquer aux autres, c'est-à-dire au moyen d'une échelle susceptible d'être reproduite à travers le temps et l'espace. Si les circonstances dans lesquelles on est appelé à observer la température sont innombrables, cette dernière peut néanmoins être définie d'une manière unique. Toutes les températures peuvent donc être repérées sur la même échelle et ce problème a pu être résolu d'une façon tout à fait générale.

A. — Les échelles.

Les diverses échelles employées au début de la thermométrie étaient fondées sur la variation avec la température d'une propriété physique déterminée d'un corps choisi; par exemple, la dilatation du mercure dans

un récipient de verre, la variation de volume ou de pression d'une certaine masse de gaz dans des conditions déterminées, etc... Mais ces échelles avaient les deux inconvénients suivants :

1. — Par suite d'inégalités accidentelles dans la reproduction des corps thermométriques, les échelles fondées sur une même propriété n'étaient pas superposables entre elles. De plus, elles ne l'étaient pas non plus à celles fondées sur une autre propriété physique.

2. — Par suite de modifications lentes dans les corps thermométriques, l'échelle des thermomètres conservés comme étalons risquait de varier et variait en effet souvent avec le temps.

L'incertitude des échelles étalons fondées sur des propriétés variant avec la nature des corps amena la proposition de Lord Kelvin d'adopter une *échelle thermodynamique* indépendante de cette nature et fondée sur le principe de Carnot. Elle se trouvait coïncider, au changement d'origine près, avec l'échelle centigrade d'un thermomètre à gaz qui serait rempli d'un gaz parfait. Par la mesure de certains coefficients déterminant le degré d'écart des gaz réels par rapport à l'état parfait, et par le calcul, on pouvait ramener à cette échelle toutes les échelles des thermomètres à gaz employés à cette époque ; elle constituait ainsi une échelle de référence fixe que l'on pouvait reproduire théoriquement partout et toujours, c'est l'échelle dite *absolue*.

Les observateurs s'efforcèrent désormais d'exprimer leurs résultats d'après cette échelle, mais, vu la difficulté de maniement du thermomètre à gaz et la façon différente dont les divers gaz s'éloignent de l'état parfait, ils se trouvaient engagés dans des recherches souvent beaucoup plus longues et délicates que le sujet principal de leur travail. Par suite des nombreuses causes d'erreur rencontrées au cours de cette étude, ils arrivaient fréquemment à des résultats discordants, simplement parce qu'ils ne reproduisaient pas de la même manière l'échelle thermodynamique.

La nécessité se faisait sentir de faire choix d'une échelle étalon pratique, qu'on pût reproduire de manière aisée et fidèle et d'après laquelle chacun exprimerait ses résultats, laissant à des laboratoires spéciaux le soin d'assurer la comparaison avec l'échelle absolue.

La première échelle étalon pratique, adoptée le 15 octobre 1887 par le Comité international des Poids et Mesures, fut celle du thermomètre à hydrogène du Bureau international des Poids et Mesures. Le Bureau assurait la distribution dans le monde entier d'étalons secondaires de cette échelle dans l'intervalle de -25° à $+100^{\circ}$ sous forme de 8 thermomètres à mercure en verre dur. Ces thermomètres étaient censés identiques à un modèle com-

paré une fois pour toutes par Chappuis au thermomètre à hydrogène. En fait ces étalons secondaires différaient souvent entre eux de plus de 0°,01.

En 1912 trois laboratoires : la Physikalisch-Technische Reichsanstalt de Charlottenbourg, le National Physical Laboratory de Teddington et le National Bureau of Standards de Washington, dans le but d'étalonner les divers instruments destinés à la mesure des températures, commencèrent une série de recherches destinées à refaire l'échelle pratique et à l'étendre vers les hautes et basses températures. Ils restèrent en correspondance à ce sujet jusqu'en 1914. Quand la guerre interrompit ces relations, l'accord était réalisé de -40° à $+1100^{\circ}$. Au-dessus de cette température, l'échelle adoptée par le Bureau of Standards diffère légèrement de celle admise par la Reichsanstalt.

La méthode employée pour étendre l'échelle, vers les hautes températures fut celle qui avait été recommandée par M. Le Châtelier en 1887 : déterminer avec précision dans les laboratoires spéciaux, au moyen du thermomètre à gaz, les températures absolues de fusion et d'ébullition d'un certain nombre de substances pures, observées dans des conditions bien déterminées ; et, d'après ces points fixes, étalonner dans les autres laboratoires les pyromètres pratiques employés. Des maisons américaines étudient, en collaboration avec le Bureau of Standards, la fabrication de corps purs, dont les points de fusion et d'ébullition sont destinés à servir d'étalons et qui pourront être facilement distribués dans le monde entier.

L'échelle pratique actuelle.

Entre -40° et $+450^{\circ}$, l'échelle pratique adoptée est définie par l'intermédiaire de celle du thermomètre à variation de résistance électrique du platine, étalonné aux températures de fusion de la glace (0°), d'ébullition de l'eau (100°) et d'ébullition du soufre ($444^{\circ}6$), sous les conditions normales de pression atmosphérique.

La relation entre la résistance R , la température p_t donnée par l'échelle de ce thermomètre et la température t de l'échelle pratique est donnée par les formules de Callendar :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100, \\ t - p_t = \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100}. \end{array} \right.$$

Le degré de pureté du platine est déterminé par le coefficient moyen de variation de résistance avec la température entre 0° et 100° , coefficient

qui ne doit pas être inférieur à 0,00388 et par la constante ε qui ne doit pas être supérieure à 1,52.

Des points fixes secondaires ont été déterminés tout le long de cette échelle.

Dans l'intervalle de $+ 450^\circ$ à $+ 1100^\circ$ l'échelle pratique est définie par les points de fusion suivants :

Antimoine : 630° . — Argent : $960^\circ,5$. — Or : 1063° . — Cuivre exempt d'oxyde : 1083° .

L'instrument généralement employé pour l'interpolation entre ces points fixes est le couple thermoélectrique, platine/platine $+ 10$ pour 100 rhodium, calibré à 3 températures.

La relation entre la température t et la force électromotrice e est donnée par la formule :

$$e = a + bt + ct^2.$$

En pratique, il suffit généralement de faire l'étalonnage de ces couples aux points de fusion du zinc ($419^\circ,4$) [ou du cadmium ($320^\circ,9$)], de l'antimoine et du cuivre. D'autres points fixes secondaires ont été repérés le long de cette échelle.

Il est curieux de remarquer que l'échelle définie par le thermomètre à résistance en platine étalonné aux 3 points : fusion de la glace, ébullition de l'eau, ébullition du soufre, coïncide jusqu'à 1100° avec l'échelle définie par le thermocouple étalonné de la manière indiquée ci-dessus. Son échelle comme étalon a été restreinte au domaine situé au-dessous de 450° par suite de l'altérabilité des thermomètres à résistance en platine aux trop hautes températures.

Au-dessus de 1100° , l'accord complet n'a pas encore été établi, mais le différend qui subsiste, bien que délicat à régler, est tout à fait minime et de peu d'importance à l'heure actuelle. Dans ce domaine, la mesure des températures est généralement fondée sur les lois du rayonnement. Parmi ces dernières, la loi de Stefan-Boltzmann sur le rayonnement intégral du corps noir a une base théorique thermodynamique extrêmement solide et a été vérifiée expérimentalement dans tout le domaine exploré, aux erreurs d'observations près. Il n'y a pas été fait appel pour définir l'échelle pratique à cause des difficultés et des incertitudes expérimentales qui sont plus grandes avec les instruments fondés sur ce principe qu'avec les autres.

La loi de Planck sur l'intensité du rayonnement suivant une longueur d'onde donnée λ en fonction de la température absolue T

$$I = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$$

où C_2 est la constante fondamentale de Planck, a également une forte base théorique, bien que d'un caractère plus hypothétique ; en tous cas, elle a également été vérifiée par l'expérience avec beaucoup de précision. Elle a récemment été critiquée par Nernst, qui aurait trouvé des écarts avec l'expérience allant jusqu'à 7 pour 100 ; mais, pour le moment, cette critique, même justifiée, n'intéresserait pas la pyrométrie, car, d'après l'auteur, ces écarts ne commenceraient à être observables que pour des valeurs du rapport $\frac{C_2}{\lambda T}$ inférieures à 10, valeurs qui ne sont pas atteintes en pyrométrie à l'heure actuelle.

La loi de Planck se réduit pratiquement à l'équation de Wien

$$I = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}};$$

dans tous les cas on l'emploie en pyrométrie, car, étant donné qu'on ne se sert que des radiations du spectre visible, et que les températures actuellement mesurées d'une façon courante ne dépassent guère 2000°, l'exposant $\frac{C_2}{\lambda T}$ reste généralement supérieur à 14. Cette équation s'emploie généralement sous la forme

$$\log_{10} \frac{I_2}{I_1} = \frac{C_2 \log e}{\lambda} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

La température absolue origine choisie T_1 , sur laquelle les laboratoires sont d'accord, est celle de la fusion de l'or (1 063° centigrades). Pour déterminer la constante C_2 les laboratoires ont cherché à mesurer, au moyen du thermomètre à gaz, la température de fusion du palladium et secondairement celle du platine.

Les allemands ont trouvé 1 557°, ce qui, dans leurs conditions d'expérience, donnait $C_2 = 14300$ micron : degré. Les américains ont trouvé 1 552°, ce qui leur donne $C_2 = 14350$. A ce désaccord près, l'échelle pratique adoptée aujourd'hui est fondée sur l'extrapolation de la formule de Wien en prenant pour température origine T_1 celle de la fusion de l'or et pour valeur de la constante C_2 l'une de celles que nous venons de donner. Telle est, à l'heure actuelle, l'échelle pratique adoptée dans les différents domaines de température, échelle qui est d'ailleurs aussi voisine de l'échelle absolue thermodynamique que l'expérience permet aujourd'hui de le vérifier.

B. — Les instruments de mesure.

Nous allons rapidement passer en revue les divers appareils pratiques de mesure en les prenant dans l'ordre des températures croissantes.

I. — Pyromètres à résistance électrique. — Ces instruments sont fondés sur la mesure de la variation de la résistance électrique d'un fil de platine en fonction de la température.

Ces variations sont de l'ordre de grandeur de l'expansion des gaz ; le rapport des résistances à 100° et à 0° est 1,39 ; le rapport à 1000° et à 0° est 4,4. Comme on sait mesurer les résistances électriques avec une grande sensibilité, si l'appareil reste fidèle, il permet une mesure extrêmement précise des températures.

Siemens qui, le premier, avait proposé cette méthode pour des buts industriels, s'aperçut rapidement que la résistance du pyromètre augmentait à l'usage, à cause d'une altération du platine qui est très rapide quand ce dernier est chauffé directement dans la flamme, qui est encore importante quand il est protégé par un tube en fer, qui est très petite avec une protection en porcelaine ou en platine. Cette augmentation de résistance pouvait atteindre 13 pour 100 à la suite de chauffés répétés à 900° . La méthode fut abandonnée pendant 20 ans.

Elle fut reprise au laboratoire par Callendar et Griffiths, qui montrèrent qu'une partie de l'altération provenait aussi du contact avec les cylindres en terre sur lesquels le fil était enroulé. En remplaçant ces derniers par des supports convenables en mica, et en limitant l'emploi de ces thermomètres aux températures inférieures à 550° environ, ils montrèrent que moyennant certaines précautions expérimentales, cette méthode était la plus précise et la plus fidèle dans le domaine indiqué. Ils comparèrent ce pyromètre au thermomètre à air et établirent la formule de référence que nous avons donnée par ailleurs.

Les deux précautions principales à prendre dans la construction de ces appareils, en plus des précautions fondamentales contre l'altération du platine, sont les suivantes.

D'abord, il faut n'avoir dans les parties chauffées aucune soudure du platine avec un fil d'un autre métal, pour éviter les effets thermoélectriques.

Ensuite, il faut éliminer la variation de résistance de la partie chauffée des conducteurs qui relient le fil thermométrique proprement dit aux instruments de mesure. Pour cela, quand l'appareil de mesure est un pont de Wheatstone, l'artifice consiste généralement, au moyen de fils supplémentaires convenablement dispersés dans le thermomètre, à distribuer un nombre égal de ces conducteurs dans les deux bras du pont, qui ne peut dès lors être employé qu'avec des bras égaux. Dans les ponts doubles, galvanomètres différentiels et les dispositifs potentiométriques, la difficulté se lève d'elle-même.

Les appareils de mesure employés dans cette partie de la pyrométrie sont les appareils classiques de mesures électriques, avec des modifications de détails destinées à les adapter à cet usage particulier.

Par suite de la proximité possible de sources de chaleur, les résistances de comparaison doivent avoir un coefficient de température particulièrement faible; et il ne doit pas y avoir contact entre deux métaux différents partout où un effet thermoélectrique pourrait être gênant.

Des appareils moins précis à lecture directe ont été construits pour plus de commodité en vue de l'industrie.

Pour les installations importantes, les appareils de mesure fondés sur une méthode de zéro peuvent être rendus automatiquement ajustables et enregistreurs au moyen d'un dispositif d'asservissement commandé par l'aiguille du galvanomètre. Ce dispositif est d'ailleurs le même quel que soit l'usage auquel est destinée la méthode de zéro. Callendar avait déjà construit un appareil enregistreur fondé sur ce principe. Le plus récent et le plus perfectionné semble être celui de la maison Leeds et Northrup dont la particularité est de produire une correction automatique proportionnelle à la déviation de l'appareil de zéro, ce qui évite les nombreuses oscillations autour de la position d'équilibre.

A part cela, les précautions que l'on prend dans l'usage de ces instruments sont les mêmes que pour toutes les mesures de résistance électrique.

Malgré son apparence robuste, le pyromètre à résistance de platine est un appareil essentiellement délicat et fragile. De plus il est coûteux ⁽¹⁾ et son emploi est limité à une échelle restreinte. Pour ces raisons, il est le plus souvent supplanté dans son propre domaine de température, pour les usages industriels, par la canne thermoélectrique, qui est moins chère, plus robuste et possède un domaine plus étendu vers les hautes températures.

Même dans le laboratoire, lorsqu'on a besoin d'un corps thermométrique très petit, ce qui est souvent le cas, on remplace le pyromètre à résistance par la soudure d'un couple.

II. — Couples thermoélectriques. — La soudure de deux métaux chauffée à une température donnée est le siège d'une force électromotrice qui, dans certaines conditions, est fonction de la température seule.

L'idée d'employer la mesure de cette force électromotrice à l'observation des températures est due à Becquerel (1830). Pouillet fut le premier

(1) On construit des appareils à résistance de nickel utilisables au-dessous de 300°.

à se servir de cette méthode d'une façon systématique, mais les études de Regnault, montrant l'infidélité de ce procédé, semblèrent le condamner définitivement.

M. Le Châtelier reprit cette étude vers 1885, dans le but de mesurer les températures utilisées dans l'industrie du ciment. Il montra que les irrégularités observées étaient dues presque uniquement à des courants parasites produits par l'élévation de température dans des fils de métaux non homogènes. Certains métaux comme le fer, le nickel, le palladium et leurs alliages étaient impropres à donner des couples à indications fidèles. Il recommanda, comme exempt de ces forces électromotrices parasites et pour des raisons d'inaltérabilité aux hautes températures le couple platine/platine + 10 pour 100 de rhodium.

Au cours de l'étude des méthodes de mesure de la force électromotrice produite, il montra la nécessité d'employer un galvanomètre ayant une résistance intérieure élevée (200 ohms au moins) pour rendre négligeable, devant la résistance totale du circuit, la variation de résistance des fils du couple avec la température.

Depuis cette époque, la méthode n'a subi aucun perfectionnement de principe, mais les diverses parties de l'appareil ont été étudiées de façon à en rendre l'emploi plus commode ou plus précis au laboratoire et pour permettre d'en répandre l'usage dans l'industrie. Des progrès nombreux et considérables ont été réalisés dans cette voie. Nous pouvons les énumérer rapidement, prenant un à un les différents organes en commençant par la partie directement chauffée.

1. *Tubes de protection.* — Les couples exposés à des températures élevées se détériorent plus ou moins vite selon le métal dont ils sont faits, soit par l'action des gaz (les métaux précieux sont attaqués par les gaz réducteurs, les autres métaux par oxydation), soit par l'action des liquides où ils sont plongés (métaux, verres fondus, etc...). Au laboratoire, on les protège, suivant la température à laquelle on opère, par des tubes de verre, de silice ou d'une porcelaine spéciale qui, avant la guerre, était fabriquée uniquement en Allemagne, mais qui, maintenant, semble avoir été mise au point également en Amérique. Dans l'industrie, on emploie, suivant les agents d'attaque, des tubes de métal (fer ou alliages de nickel-chrome); des tubes en terres réfractaires et porcelaines diverses, qui sont certainement les meilleurs au point de vue de l'impénétrabilité aux gaz, mais qui sont fragiles aux chocs et aux variations brusques de température; des tubes en carborundum qui ont sur la porcelaine l'avantage d'avoir une plus grande

conductibilité calorifique. donc de suivre rapidement les variations de température.

Cette question, qui est primordiale pour assurer la longue durée et le bon état permanent des couples, est considérée comme n'étant pas encore parfaitement au point d'une façon générale.

Des petits tubes en porcelaine sont également employés pour assurer l'isolement réciproque des fils des couples.

2. *Couples en métaux divers.* — Au laboratoire, les couples en platine ne peuvent guère être employés d'une manière continue, même au prix de certaines précautions, que jusque vers 1 600°. Il a été construit des couples iridium/iridium + 10 pour 100 ruthénium, que l'on peut employer jusque vers 2 100°. mais qui sont d'un maniement délicat à cause de leur fragilité. Quand on ne veut pas dépasser 700°, on emploie quelquefois le couple argent/constantan, qui donne une force électromotrice supérieure à celle des couples de platine.

Dans l'industrie et aussi dans les laboratoires lorsqu'on n'a pas besoin d'une haute précision, on emploie les couples suivants en métaux ordinaires :

Cu/Constantan jusqu'à 500° ;

Fe/Constantan jusqu'à 900°.

Chromel (alliage Ni et Cr)/Alumel (alliage Ni et Al) jusqu'à 1 300°.

Leur inconvénient est d'être, sauf peut-être le dernier, moins fidèles et plus altérables. Mais ils ont l'avantage énorme d'être à bon marché, ce qui permet de les construire en grosses cannes très robustes et possédant une faible résistance électrique : on peut alors adopter des galvanomètres moins délicats.

Un problème important qui s'est posé pour faciliter l'introduction de ces couples dans l'industrie, c'est d'assurer leur remplacement, nécessairement plus fréquent que pour les couples précieux, sans avoir besoin de procéder à de nouveaux étalonnages. La chose était résolue depuis longtemps pour les couples en platine ; il était plus délicat d'assurer la régularité de fabrication des alliages de métaux ordinaires. Au moyen d'un service d'essai et de classement par lots des fils lors de leur fabrication, certaines maisons américaines garantissent l'interchangeabilité des couples à 2 pour 100 près, ce qui suffit dans bien des cas.

3. *La soudure froide.* — La force électromotrice indiquée par l'instrument de mesure dépend de la température du point où les fils du couple

rejoignent les conducteurs de cuivre, qui sont rattachés aux bornes de l'appareil.

On cherche donc à maintenir cette température constante et au voisinage de 15° . Nombreux sont les appareils compliqués, fondés sur divers principes, proposés pour compenser automatiquement les élévations de température accidentelles de la soudure froide. Des dispositifs analogues sont d'ailleurs proposés pour compenser les petits défauts d'interchangeabilité des couples de métaux ordinaires. Ceux dont le principe est correct sont avantageux en période de bon fonctionnement, mais, au moindre accident, généralement invisible, ils constituent un remède pire que le mal. Le meilleur procédé, c'est, au moyen de fils de même nature que les alliages du couple, mais de plus faible section au besoin, d'amener cette soudure froide et les instruments de mesure en un point suffisamment éloigné du four pour pouvoir aisément en maintenir la température constante. Dans le cas des alliages en métaux précieux, en particulier du platine/platine rhodié, on remplace ces longs conducteurs à partir du point où la température du fil ne dépasse plus 500° , par des fils meilleur marché. l'un en cuivre, l'autre en cupronickel de composition telle qu'ils forment avec les deux fils du couple principal deux couples secondaires opposés l'un à l'autre et dont les forces électromotrices se détruisent d'une manière satisfaisante dans le domaine de température employé. La seule précaution à prendre est de maintenir ces deux couples à la même température, ce qui est aisé.

4. — *Appareils de mesure.* — La mesure de la force électromotrice se fait le plus commodément par un appareil à lecture directe. Au laboratoire et à l'usine, le galvanomètre à spot lumineux a été remplacé par des millivoltmètres à cadran. La construction de ces appareils a été spécialement mise au point pour assurer une protection efficace contre les accidents auxquels ils sont exposés. On peut compter sur la fidélité de leur étalonnage. Mais on ne peut empêcher la variation de sensibilité, donc d'indication, due à l'augmentation progressive de la résistance du circuit, produite par l'altération du couple. Juste avant la rupture du couple, cette résistance est énorme et peut l'avoir été longtemps auparavant sans qu'on le sache.

Les dispositifs potentiométriques, plus coûteux et plus compliqués, ne donnent pas de lecture directe, mais leurs indications sont indépendantes de la résistance de la ligne. Au laboratoire, ils donnent plus de précision. à l'usine plus de sécurité. Pour supprimer l'élément étalon Clarke ou

Weston, qui est toujours une partie délicate dans l'appareil, on emploie parfois un dispositif mixte, qui donne une mesure du courant passant dans les résistances après l'ajustement, au moyen du galvanomètre même qui sert d'appareil de zéro. Dans les appareils portatifs, il reste l'inconvénient d'avoir à produire ce courant: on le fait au moyen de piles sèches, qui sont malgré tout encombrantes et causent de nombreux ennuis.

Pour supprimer tous ces impedimenta et revenir à l'appareil à lecture directe, il a été construit par Harrisson et Foote un dispositif très ingénieux, pour permettre de vérifier immédiatement, sans l'aide d'aucun autre instrument que le galvanomètre lui-même, la résistance de la ligne extérieure et de la ramener à une valeur constante de 15 ohms. En fermant une clé on supprime à la fois une résistance en série avec le cadre du galvanomètre et l'on shunte celui-ci par une autre résistance. Ces résistances sont calculées de telle manière que, si la résistance du circuit extérieur est de 15 ohms, la déviation du galvanomètre ne change pas. Si la déviation change, on agit sur un rhéostat compensateur, en série sur la ligne, pour obtenir la résistance désirée. Cela donne un contrôle rapide et simple. Le seul inconvénient de l'appareil est, si le galvanomètre est enregistreur, qu'il ne peut servir que pour donner les indications d'un seul couple.

5. — *Enregistrement.* — Au laboratoire, l'enregistrement des indications des appareils à lecture directe se fait généralement photographiquement si l'enregistrement doit être automatique, à la plume si l'on se contente de suivre à la main un spot lumineux. Par l'emploi de mouvements d'horlogerie, de combinaisons et d'associations de couples et de galvanomètres divers, on arrive commodément aujourd'hui à enregistrer la température en fonction du temps, de la vitesse de variation de la température, de l'inverse de cette vitesse, et enregistrer certaines courbes dites différentielles destinées à déceler les points de transformation allotropique.

Dans l'industrie, l'enregistrement doit se faire au grand jour, sur une carte qui tourne ou se déroule, afin de pouvoir être suivie tout le temps. Vu la faiblesse du couple moteur du galvanomètre, la plume portée par l'aiguille n'est mise en contact avec le carton, au moyen d'électro-aimants, que par des à-coups réguliers entre lesquels l'aiguille est libre. L'on obtient ainsi un enregistrement ponctué. Au moyen d'un dispositif de distribution actionné par un mouvement d'horlogerie, l'enregistreur peut être mis successivement en rapport avec différents couples. L'on construit des enregistreurs multiples pour 6 couples. Les couples sont différenciés sur la carte par différentes couleurs d'encre et des différences dans la loi de ponctuation des courbes.

Les dispositifs potentiométriques peuvent être rendus auto-ajustables et enregistreurs par des procédés d'asservissement qui ont été décrits à propos du thermomètre à résistance électrique.

III. — Pyromètres à radiations. — 1. *Pyromètres optiques.* — Le premier appareil, donnant d'une façon correcte la mesure des températures en s'appuyant sur les lois de radiation des corps chauds, fut le pyromètre optique de M. Le Châtelier, construit en 1892, avant la publication des travaux de Wien sur la répartition de l'énergie dans le spectre de radiation des corps noirs incandescents. Cet appareil contient déjà toutes les pièces essentielles, que les études récentes ont perfectionnées une à une jusqu'à en tirer des instruments de haute précision,

Ces diverses parties sont les suivantes :

a) Un dispositif destiné à donner une image réelle de la source lumineuse dont on veut mesurer la température ;

b) Une source lumineuse de comparaison, d'éclat connu, dont on juxtapose ou superpose l'image à celle des corps que l'on étudie ; dans le cas actuel, une lampe à essence ;

c) Un oculaire d'observation simultanée des deux images, muni d'un verre monochromatique rouge ;

d) Un dispositif d'égalisation de l'éclat des deux images ; dans le cas actuel un diaphragme œil de chat, placé devant l'objectif de la lunette qui vise l'objet étudié, et dont on peut mesurer l'ouverture ;

e) Etant donné que l'éclat de la source étudiée varie, dans le domaine exploré, dans le rapport de 1 à 1 000 000, une série de verres absorbants neutres, de pouvoir absorbant connu, que l'on place sur le trajet des rayons lumineux, émanant de la source trop chaude par rapport à l'autre, pour pouvoir obtenir une mesure effective au moyen du diaphragme œil de chat.

Par quelques mesures préliminaires et par des calculs simples, on établissait une relation donnant l'intensité de la radiation lumineuse mesurée, en fonction du nombre des verres absorbants employés et de l'ouverture du diaphragme ; M. Le Châtelier, par comparaison avec son couple thermoélectrique, avait établi la relation empirique suivante entre l'intensité de la radiation rouge vue à travers son appareil et la température de la source qui l'émettait :

$$I = 10^{6,7} T^{-\frac{3210}{T}}$$

L'intensité des radiations émises par un corps incandescent dépend

non seulement de sa température, mais aussi de la nature de sa surface et de la température de l'enceinte qui l'entoure. La formule ci-dessus est établie pour le rayonnement du corps noir, radiateur intégral. Les corps qui ne rayonnent pas intégralement donneront, pour une même température, une intensité de rayonnement moindre, que l'on peut représenter par l'intensité de rayonnement du corps noir, multipliée par un nombre plus petit que 1, que l'on appelle le *pouvoir émissif*. Ce coefficient peut dépendre du corps considéré, de la longueur d'onde étudiée et de la température du corps (on se place à l'abri de la réflexion de la lumière émise par les corps voisins). Si l'on a des données sur la valeur de ce pouvoir émissif, une correction sur la mesure permettra de connaître la température du corps; sinon, l'on se contentera d'appeler le résultat de la mesure : *température d'éclat équivalent du corps noir pour la longueur d'onde considérée*. Ce terme s'explique de lui-même, il donne évidemment un nombre inférieur à la température réelle du corps étudié.

L'appareil construit sur cette théorie schématique donne généralement une mesure des températures, entre 500° et 2 000°, correcte à quelques degrés près dans le bas de l'échelle, quelques dizaines dans le haut, ce qui est suffisant dans la plupart des cas. Mais, pour en faire un appareil de précision; il a fallu, soit le munir d'un spectroscope, soit faire une étude approfondie de la transmission et du pouvoir absorbant des verres neutres et de couleur. Mais, cet appareil une fois perfectionné, il reste, pour parfaire et étendre son usage, à entreprendre une étude qui, elle, n'a presque pas avancé, bien qu'elle soit de première importance, celle du pouvoir émissif des différents corps.

Les différentes modifications apportées à cet appareil dans la suite, portent généralement sur le dispositif d'égalisation de l'éclat des deux images. Féry proposa une lame absorbante d'épaisseur variable, constituée par deux prismes glissant l'un sur l'autre. Wanner construisit un appareil où l'intensité de la lumière est réglée par deux nicols croisés; appareil compliqué, fragile et sujet à de multiples causes d'erreur. Il n'y eut donc pas de progrès importants dans cette voie.

Au point de vue théorique, Wien publia, à ce moment, la loi qui sert de base à l'échelle pratique de température et Planck donna un fondement théorique, à cette formule légèrement modifiée,

Les meilleurs appareils modernes emploient un dispositif suggéré par Morse, légèrement différent des précédents. Comme source lumineuse de comparaison, on se sert d'une lampe électrique qui se détache sur la source étudiée ou bien se trouve dans le plan de son image donnée par un téles-

cope. Au moyen d'un rhéostat placé sur le circuit de la lampe, on fait varier l'éclat de cette dernière jusqu'à ce que le filament disparaisse sur l'image du corps étudié. Si le filament et le corps étudié sont des radiateurs intégraux, ils sont à ce moment à la même température, et il suffit, pour connaître cette dernière, d'avoir, une fois pour toutes, mesuré la température de la lampe en fonction de l'intensité du courant électrique qui la traverse. Pour connaître cette fonction, on détermine empiriquement la relation qui relie cette intensité avec l'éclat de la lampe pour une longueur d'onde connue et, au moyen de la formule de Wien, on en déduit la température.

Dans l'hypothèse où l'on a affaire à deux corps noirs, l'égalité d'éclat obtenue pour la totalité du spectre lumineux se conserve si l'on n'observe les radiations émises que suivant une longueur d'onde d'ailleurs quelconque, parce que la loi de répartition de l'énergie dans le spectre est la même pour les deux corps à la même température ; donc, quelle que soit la longueur d'onde choisie pour l'étalonnage de la lampe, on obtiendra toujours la même relation entre la température et l'intensité du courant. Si le corps étudié n'est pas un radiateur intégral, la loi de répartition de l'énergie dans le spectre ne sera pas la même que pour la lampe ; le courant traversant la lampe au moment de l'égalité d'éclat variera en général avec la longueur d'onde ou l'ensemble de longueurs d'ondes choisis, et l'on ne pourra généralement pas obtenir la disparition du filament en observant la totalité du spectre lumineux, à cause de la différence de coloration des deux lumières émises. Les températures obtenues au moyen de la courbe d'étalonnage dont nous avons parlé seront ce que nous avons appelé les températures d'éclat équivalent du corps noir pour telle ou telle longueur d'onde ou pour tel ensemble de longueurs d'ondes.

La possibilité de construire un pyromètre d'après ce principe dépendait de la résolution du problème technique suivant : construire des lampes dont le filament soit un corps noir et qui donnent pendant très longtemps le même éclat pour la même intensité de courant. On fit d'abord des lampes à filament de charbon, qui donnaient des résultats assez satisfaisants à condition de ne pas être trop poussées. Aujourd'hui, l'on a choisi des lampes spéciales à filament de tungstène, qui peuvent être poussées à une température supérieure sans sublimation, qui dépensent moins de courant pour un même éclat (ce qui permet d'avoir des batteries d'accumulateurs portatives moins encombrantes) et qui prennent plus rapidement leur température de régime. Comme l'implique le second de ces avantages, le tungstène est un corps à rayonnement sélectif ; mais, heureusement, dans le spectre lumineux, le seul utilisé dans cet appareil, il se comporte

comme un corps très gris, c'est-à-dire à pouvoir émissif voisin de l'unité et sensiblement indépendant de la longueur d'onde.

L'appareil absolu est le pyromètre spectral de Henning. Il se compose essentiellement du télescope de visée: au foyer de ce dernier est la lampe électrique à intensité réglable mesurée au milliampermètre: comme appareil de sélection de longueurs d'onde, on emploie un dispositif spectrométrique qui permet de garder un intervalle de longueurs d'ondes aussi étroit que l'on veut et très bien déterminé. Quand la température à mesurer devient trop élevée pour qu'on puisse, sans risques, pousser la lampe, on dispose devant le télescope un disque à secteurs pour réduire la quantité de lumière qui parvient de la source. Soit S la température observée sans le diaphragme: Θ , celle observée avec le diaphragme et la même courbe de correspondance entre l'intensité du courant et la température, la théorie du phénomène montre que l'on a la relation

$$\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{S} = A,$$

A étant une constante que l'on mesure pour une seule température commodément choisie. Cette relation permet d'étendre autant qu'on voudra, vers le haut, le domaine des températures explorables.

L'appareil pratique contient le même télescope de visée et la même lampe avec son milliampermètre, son rhéostat et sa batterie portative. Comme appareil d'observation, un oculaire muni d'un simple verre rouge.

On choisit un verre rouge pour plusieurs raisons; d'abord, ce sont les seuls verres à peu près monochromatiques que l'on sache faire; ensuite, dans le domaine de température exploré, la superposition du spectre émis et de la courbe de sensibilité de l'œil donne son maximum d'intensité dans le rouge, c'est donc dans le rouge que les mesures photométriques auront le plus de précision. Mais, même les meilleurs verres rouges ne donnent pas une lumière strictement monochromatique; ils donnent une bande d'intensité à peu près constante, s'étendant de $0,62 \mu$ à la limite du spectre visible. Nous avons vu que cela ne change rien à la mesure du courant qui passe dans la lampe, dans le cas où l'on vise un radiateur intégral, et comment il faut interpréter cette lecture dans le cas contraire. Mais, lors de l'étalonnage de l'appareil, pour appliquer la formule de Wien, la connaissance de la longueur d'onde employée est nécessaire.

Le calcul montre que tout se passe comme s'il était fait usage d'une lumière strictement monochromatique de longueur d'onde λ_L appelée *longueur d'onde effective du verre rouge employé*. λ_L est fonction de la tempé-

rature de l'objet observé, il ne faut pas oublier d'en tenir compte au cours de l'étalonnage qui est d'ailleurs généralement fait par le fabricant. De plus, lorsque, pour monter à des températures plus élevées que celles où l'on peut pousser la lampe, on emploie des dispositifs de réduction de l'éclat de l'objet visé, le nombre A , qui entre dans la formule dont nous avons parlé, est fonction de λ_L , donc de la température. Cette formule serait sans intérêt pratique; il faudrait un étalonnage direct sur toute l'échelle. Mais, si le dispositif de réduction d'intensité est un verre absorbant de pouvoir de transmission T_r , également variable avec la température, le calcul montre que A est fonction du produit $\lambda_L T_r$. La maison Leeds et Northrup prétend fabriquer des couples de verres rouges et absorbants associés, pour lesquels ce produit reste constant quand la température varie, et l'on peut extrapoler vers le haut, au moyen d'une seule échelle d'étalonnage, la détermination de A étant faite pour une seule température choisie de façon commode.

Avec cet appareil ainsi combiné, les mesures faites aux environs de 1500° par différents observateurs concordent entre elles, dans l'industrie à 5° près et au laboratoire, avec certaines précautions, à $0,2$ près.

Dans le domaine de température actuellement embrassé, il semble donc que cet instrument, d'un maniement commode, donne des résultats atteignant toute la perfection désirable.

2. *Pyromètres à rayonnement intégral.* — Bien que la loi du rayonnement intégral soit établie avec une certitude au moins aussi grande que celle de Planck, on ne s'en est pas servi pour définir l'échelle pratique à cause des inconvénients suivants :

Les radiations infra-rouges, qui constituent une partie importante du rayonnement, sont absorbées avec une grande facilité par certains gaz comme CO_2 ou la vapeur d'eau, qui existent toujours dans les foyers ;

Ces appareils ne permettent pas de viser de petits objets ;

Lorsqu'on mesure la température des corps non noirs, la *température équivalente de rayonnement intégral* est plus éloignée de la température réelle que les températures d'éclat équivalent ;

Enfin, la mesure du rayonnement est fondée, sauf dans des appareils tout à fait spéciaux, sur la mesure de la température, à l'état d'équilibre, d'un corps qui reçoit ces radiations et se refroidit dans des conditions supposées constantes. Il est rare que ces conditions ne varient pas rapidement avec le temps (état des surfaces métalliques ternies ou salies par les poussières) ou soient identiques à l'étalonnage et à l'emploi. L'on a parfois, de

ce fait, des erreurs de plusieurs centaines de degrés. Cependant, les appareils de ce type, où la mesure des températures se fait au moyen d'un thermocouple, ont un grand intérêt pratique, car ce sont les seuls qui ont été rendus enregistreurs dans ce domaine de températures.

C'est sur ce principe qu'étaient fondés l'antique appareil de Gasparin et les appareils plus récents de Pouillet, du Père Secchi et de Violle, destinés à mesurer la température du soleil. Ils trouvèrent des résultats variant suivant les expériences et les auteurs, entre 4 300° et plusieurs millions de degrés, car ils étaient fondés sur l'extrapolation soit de la formule de Newton

$$q = a (t_1 - t_0),$$

soit de celle de Dulong et Petit

$$q = a^t,$$

satisfaisantes seulement dans un intervalle de température trop restreint. La loi

$$E = \sigma (T^4 - T_0^4)$$

fut énoncée d'abord par Stefan après des expériences assez grossières; puis, assise sur des bases théoriques par Boltzmann et, enfin, vérifiée avec précision par Lummer et Pringsheim. En même temps les appareils se perfectionnaient. Les plus intéressants sont :

Le pyréliomètre étalon de Smithsonian où l'énergie absorbée est mesurée au moyen d'un calorimètre à circulation d'eau.

Le bolomètre de Langley, fondé sur l'augmentation de la résistance électrique avec la température. C'est cet appareil qui a permis l'exploration du spectre pour y déterminer la distribution de l'énergie ;

Le télescope de Féry, spécialement destiné à la mesure des hautes températures.

L'image de la plage lumineuse est produite au foyer d'un miroir métallique convexe, au moyen d'un système de mise au point très ingénieux. Là se trouve la soudure d'un couple très sensible, au fond d'un cylindre d'argent noirci, qui ne laisse converger sur le couple qu'un angle solide de lumière toujours le même, de sorte que la mesure de la température ne dépend pas de la distance qui sépare l'appareil de la source lumineuse, à condition que l'image soit plus grande que le diamètre du cylindre.

Les appareils de Thwing et Foster ne sont que des modifications infimes de l'appareil de Féry, dans le but de le rendre plus portatif et de supprimer la nécessité d'une mise au point du système optique.

3. *Pyromètres à coloration.* — Une dernière catégorie de pyromètres à radiation est celle fondée sur la couleur de la lumière émise. En effet, du moment que la forme de la courbe de répartition de l'énergie change avec la température, la richesse de la lumière en radiations de longueurs d'ondes diverses change d'une façon continue; donc, la couleur de la lumière varie quand la température s'élève. Cette couleur fut la première méthode employée par les ouvriers pour apprécier à l'œil les hautes températures. Pouillet avait essayé de donner un aspect de mesure véritable à cette méthode, en établissant une échelle de désignation de ces couleurs variant du rouge sombre au blanc éblouissant, correspondant à des températures qu'il donnait. Mais cette échelle n'avait d'abord qu'une valeur subjective et, de plus, changeait complètement selon que l'observation était faite de jour ou de nuit. On perfectionna d'abord cette appréciation dans une partie de l'échelle en sélectionnant les radiations bleues au moyen d'un verre au cobalt. Puis Mesuré et Noël employèrent, pour repérer une température déterminée, un pyroscope sélectionnant la teinte sensible au moyen de nicols croisés et d'un quartz perpendiculaire à l'axe, d'épaisseur convenable.

Ce n'étaient point des appareils de mesure.

Crova donna à cet appareil un principe scientifique en comparant les intensités de deux radiations de longueurs d'onde déterminées; mais la complication des mesures était telle que les mesures de températures étaient très mauvaises.

Patterson et Dudding reprirent récemment cette méthode sous la forme plus simple que voici : ils éclairaient les deux plages d'un photomètre à contraste simultanément avec la source étudiée et la lumière émise par une lampe à filament de tungstène, dont ils faisaient varier la température jusqu'à ce que les deux plages soient éclairées avec une lumière de la même couleur. Si les corps étaient tous les deux des corps noirs, les deux sources étaient à la même température; sinon on obtenait un nombre qu'on appelait *la température d'égle coloration du corps*.

L'intérêt de cette méthode est que cette température est généralement légèrement supérieure à la température réelle, tandis que les températures d'éclat ou de rayonnement intégral sont inférieures à cette température et beaucoup plus éloignée d'elle. La température réelle se trouve donc encadrée, ce qui peut donner de précieux renseignements sur la limite inférieure du pouvoir émissif. Les auteurs prétendent aussi que la sensibilité de cette méthode est plus grande que celle fondée sur l'intensité des radiations. Cette méthode est encore à l'étude.

Féry et Nordmann ont fait, avec des méthodes basées sur ce principe,

des séries de mesures de la température des étoiles. Cette méthode est d'ailleurs la seule applicable aux étoiles dont le diamètre apparent n'est pas résoluble au télescope.

C. — Conclusion. — En résumé, la pyrométrie moderne a pris naissance presque simultanément, en Angleterre, avec le pyromètre à résistance électrique de platine et, en France, avec le couple thermoélectrique bientôt suivi du pyromètre optique.

Ces instruments furent rapidement jugés susceptibles d'assez de précision pour pouvoir servir d'organe d'interpolation et d'extrapolation étalon dans une nouvelle échelle pratique des températures, jalonnée par une série de points fixes (températures d'ébullition ou de fusion de divers corps purs). Ce fut surtout le travail du Bureau of Standards de Washington.

Chaque méthode trouva son domaine approprié.

Le pyromètre à résistance fut trouvé être l'instrument de haute précision depuis la température ordinaire jusque vers 500°.

Le couple thermoélectrique, plus robuste, fut adopté pour définir l'échelle jusque vers 1100°. température où le pyromètre précédent se détériore rapidement. Son maniement commode le fait souvent utiliser même pour les températures inférieures à 500°. La mise au point d'un appareillage approprié et l'étude de couples en métaux non précieux en ont considérablement vulgarisé l'usage à l'usine et au laboratoire.

Le pyromètre optique reste le seul instrument utilisable aux températures où tous les corps se détériorent plus ou moins rapidement. La mise au point d'un appareil avec lampe électrique de comparaison à filament métallique a doté les laboratoires et l'industrie de l'instrument le plus satisfaisant à l'heure actuelle.

Les questions posées par la pyrométrie et les problèmes résolus ou étudiés par son intermédiaire ont pris ces dernières années une importance telle qu'il a été tenu aux Etats-Unis, en septembre 1919, un Congrès spécial de pyrométrie où furent exposés tous les progrès récemment accomplis.

Quel que soit le haut degré de perfection qu'ait atteint la pyrométrie, dans le laboratoire et dans bien des branches de l'industrie, il est cependant des cas où son emploi est loin d'être au point. Deux exemples sont particulièrement importants : les fours de fusion du verre et de fusion de l'acier, où la température, aux environs de 1500°, a besoin d'être connue avec une grande précision. Les causes qui font la difficulté du problème ont déjà

été signalées au cours de cet article : si l'on emploie des couples thermo-électriques, l'attaque rapide, l'inefficacité ou la fragilité des tubes de protection ; si l'on emploie le pyromètre optique, l'ignorance dans laquelle on est des pouvoirs émissifs et réfléchissants. Des études et perfectionnements intéressants sont à attendre dans ces deux voies. Provisoirement, on résout le problème en plaçant, en un endroit donné du four, un tube de graphite fermé à un bout et en visant l'intérieur avec un pyromètre optique : on est alors à peu près dans les conditions de rayonnement du corps noir.

Un auteur américain, Northrup, a récemment proposé d'employer, à la mesure des températures les propriétés de l'étain fondu, qui serait une matière pyrométrique idéale : en effet, il fond à 231°, il peut être chauffé jusque au-dessus de 2 000° sans émettre sensiblement de vapeurs. De plus, sa dilatation et la variation de sa conductibilité électrique seraient linéaires par rapport à la température. La réalisation pratique de ces mesures constituerait une méthode permettant d'embrasser tout l'intervalle de températures actuellement utilisé au-dessus de 231°.

Manuscrit reçu le 1^{er} octobre 1920.

H. WEISS.

Pour les détails techniques des principales questions exposées dans cet article.

Bibliographie. — 1. BURGESS et LE CHATELIER. *High Temperature Measurements.*

2. *Bureau of Standards.*

3. *Bulletin of the American Society of Mines and Metallurgical Engineers.*
Juillet-Août-Septembre 1919.
