

l'élément; dans l'appareil de M. Violle, il faut, au contraire, changer le thermomètre, ce qui rend les expériences difficilement comparables.

La pile (fig. 29) est constituée par 25 lames de bismuth et d'antimoine; ces lames sont très minces, puisque l'ensemble de l'appareil n'a que 5 millimètres de

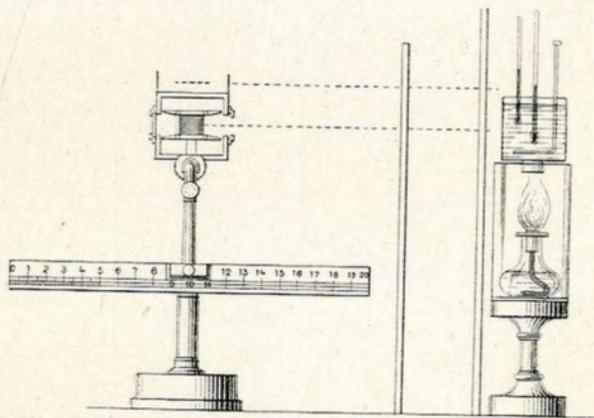


Fig. 29.

côté. Le tout est contenu dans un petit tube de métal (fig. 19).

Pour faire une expérience, on dispose d'abord devant la pile un écran rempli d'eau, que l'on enlève au moment où l'on veut faire une mesure.

Une première graduation faite avec un cube de Leslie en fer rempli de mercure que l'on a chauffé de 0° à 300° a donné; les résultats suivants :

Excès de la température du cube sur la température ambiante.	Division du galvanomètre.
32 ^o ,8	10
112 ^o ,8	55
192 ^o ,8	141,9
272 ^o ,8	283,5

La loi de Newton et celle de Dulong et Petit ne don-

nant aucune concordance entre les nombres trouvés et les nombres calculés, Rosetti a proposé la formule :

$$Q = a T^2 (T - \theta) - b (T - \theta),$$

T température absolue du corps rayonnant; θ température ambiante absolue. Cette formule à deux paramètres permet nécessairement de suivre le phénomène de plus près qu'une formule à un seul paramètre.

T - θ	DÉVIATIONS observées.	DÉVIATIONS CALCULÉES	
		Loi de Dulong.	Loi de Rosetti.
50	A = 17,2	A + 2,12	A - 0,23
100	46,4	+ 0,95	"
150	90,1	- 2,12	A + 0,70
200	151,7	+ 4,82	+ 0,99
250	234,7	+ 2,83	- 0,12

Rosetti a montré ensuite que la formule qu'il a proposée ne conduisait pas à des résultats absurdes pour les températures plus élevées. Une masse de cuivre fut chauffée au rouge dans une flamme, et on estima sa température par la méthode calorimétrique (procédé assez incertain parce qu'on ne connaît pas la loi de variation de la chaleur spécifique du cuivre). Les deux méthodes donnèrent, l'une 735° et l'autre 760°. Cet écart de 25° est inférieur aux incertitudes expérimentales.

Des disques de métal noircis et placés dans le haut de la flamme d'un bec Bunsen ont donné, d'après la formule, des températures voisines de 1 000°; de l'oxychlorure de magnésium dans le chalumeau oxyhydrique a donné 2 300°. Tous ces nombres sont vraisemblables.

Rosetti en employant cette formule a trouvé 10 000° pour la température du soleil, ce nombre résultant d'une extrapolation depuis 300°.

Expériences de Wilson et Gray. — Ces savants ont mesuré l'intensité de la radiation au moyen d'une soudure thermo-électrique, procédé dont l'idée première est due à MM. Deprez et d'Arsonval. Un cadre mobile formé de deux métaux différents (argent et palladium) est suspendu par un fil de cocon de soie entre les branches d'un aimant. On fait tomber la radiation solaire sur une des soudures, tandis qu'on dirige sur l'autre soudure une source de chaleur qui équilibre exactement

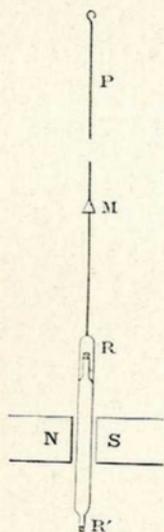


Fig. 30.

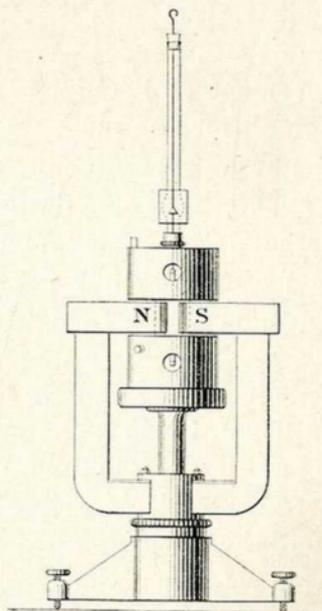


Fig. 31.

la première. Comme la température de cette source auxiliaire est nécessairement moindre, il faut que l'angle apparent sous lequel elle est vue par le galvanomètre soit plus grand.

MM. Wilson et Gray ont employé un dispositif similaire au radiomicromètre de M. du Boys. Le fil de suspension est en quartz ; les métaux employés sont le

bismuth et l'antimoine : la force électromotrice ainsi produite est vingt fois plus grande que celle obtenue avec le couple argent-palladium. Les lames métalliques R et R' (fig. 30) sont très minces ($0^{\text{mm}},1$), ce qui rend la construction de l'appareil assez délicate. Pour protéger le cadre mobile contre les courants d'air on l'entoure d'une enveloppe métallique (fig. 31); un tube ouvert laisse pénétrer la radiation; des diaphragmes placés à l'intérieur de ce tube s'opposent à toute agitation de l'air.

Au lieu de mesurer comme on aurait pu le faire l'angle de déplacement de l'équipage mobile, les auteurs ont préféré employer une méthode de réduction au zéro en utilisant une autre radiation, celle du *meldomètre* de M. Joly appareil qui sert également à la graduation du radiomicromètre. Le *meldomètre* est constitué par une lame de platine chauffée par un courant électrique; les dimensions sont les suivantes : 102 millimètres de longueur, 12 millimètres de largeur et $0^{\text{mm}},01$ d'épaisseur. Cette lame est disposée au milieu d'une enceinte entourée d'eau. Fixée à une extrémité, elle est tendue à l'autre par un ressort et porte de ce côté un levier sur lequel est fixé un miroir, dispositif destiné à amplifier les variations de longueur de la lame résultant de son échauffement par le passage d'un courant plus ou moins intense.

On détermine la relation entre les changements de longueur et la température au moyen de la fusion de très petits fragments ($1/10$ de milligramme) de corps dont on connaît le point de fusion : MM. Wilson et Gray ont employé les suivants, qui, pour l'or et le palladium, sont certainement trop faibles.

Chlorure d'argent	452°
Or	1045
Palladium	1500



Ils ont, avec cet appareil, vérifié jusqu'à la fusion du platine, la loi du rayonnement donnée par Stefan

$$Q = a (T^4 - T_0^4).$$

Pour les expériences de graduation, on éloigne le meldomètre de façon à rendre son action sur le radiomètre toujours la même, et on admet que l'intensité varie en raison inverse du carré de la distance. Il est de plus nécessaire de connaître le pouvoir émissif du platine; Wilson et Gray ont pris comme point de départ des résultats fournis par des expériences antérieures :

t	Pouvoir émissif.
300°	$\frac{1}{5,4}$
600°	$\frac{1}{4,2}$
800°	$\frac{1}{3,9}$

et, par extrapolation ils ont trouvé $1/2,9$ à la température de 1250° , température qui équilibrait la radiation du soleil, avec l'angle apparent assez grand, sous lequel l'appareil voyait le meldomètre.

En admettant alors avec Rosetti et Young une absorption zénithale de 30 p. 100, la température du soleil, supposé un corps noir, a été trouvée égale à 6200° environ.

Ce nombre doit être un peu trop faible, en raison de l'erreur commise sur les points de fusion employés pour la graduation.

Expériences de Langley. — Langley a proposé, sous le nom de bolomètre, un appareil radiométrique qu'il n'a jamais employé à la mesure des températures, mais

qui pourrait l'être comme les précédents et qui a sur eux l'avantage d'être bien plus sensible encore.

Il consiste en un pont de Wheatstone constitué avec des fils plats extrêmement minces ($\sigma^{mm}, 01$) et très courts (quelques millimètres au plus). On mesure les variations de résistance de l'un des fils du pont soumis à la radiation. Le courant qui traverse le système est capable d'élever déjà la température des fils de 3° à 4° ; le supplément de chaleur fourni à l'un des fils produit une déviation du galvanomètre.

Le système est fixé au fond d'un tube qui peut être orienté comme une lunette vers le corps dont on veut mesurer le rayonnement; des diaphragmes fixés de place en place arrêtent les courants d'air intérieurs. On peut aussi, à l'aide d'une lentille, concentrer la radiation sur le fil et amplifier ainsi beaucoup l'effet produit quand l'angle apparent de l'objet est petit.

Le bolomètre de Langley n'a guère servi jusqu'ici qu'à étudier la répartition de l'énergie radiante dans le spectre solaire, et surtout dans l'infra-rouge.

Conditions d'emploi. — On s'est étendu assez longuement sur les pyromètres par radiation qui n'ont pourtant servi jusqu'ici qu'à un usage bien spécial, l'estimation de la température du soleil, parce qu'il est possible qu'un jour ou l'autre leur usage pénètre dans les usines où ils pourraient rendre de réels services. Dans un certain nombre d'appareils industriels, les températures sont tellement élevées, qu'aucun corps, même le platine, ne peut résister longtemps à leur action. Le jour où l'on voudra avoir des appareils à indications continues et, en même temps, tout à fait inaltérables, il faudra s'adresser aux pyromètres à radiation.

Un tube en terre réfractaire traversant la paroi du



four, pénétrant au milieu de celui-ci sur une longueur de 0^m,50 à 1 mètre, bouché vers l'intérieur et ouvert vers l'extérieur, donnerait une surface rayonnante à la température du four qui pourrait être examinée au moyen d'une lentille projetant sur l'appareil de mesure l'image du fond fermé de ce tube.



CHAPITRE VIII

PYROMÈTRE A RADIATION LUMINEUSE

Principe. — Au lieu d'utiliser la totalité de l'énergie rayonnée comme dans les méthodes décrites au chapitre précédent, on emploie seulement les radiations visibles. Cette utilisation peut se faire de bien des façons différentes, qui donnent des méthodes inégalement précises et d'un emploi inégalement facile.

Avant d'aborder leur étude, il est utile de rappeler quelques propriétés des radiations.

Lois de Kirchoff. — Un corps incandescent émet des radiations de longueurs d'onde différentes. Pour une longueur d'onde donnée et une température donnée, l'intensité de cette radiation émise n'est pas la même pour les différents corps : on dit qu'ils ont, pour cette radiation, un *pouvoir émissif* différent. De même, un corps, qui reçoit des radiations d'une longueur d'onde donnée, en absorbe une partie et en renvoie une autre partie par diffusion ou réflexion ; une certaine quantité pourra même traverser le corps. Le *pouvoir diffusif*, ou *réfléchissant*, ou *transmettant*, à une température donnée, pour une longueur d'onde donnée, varie d'un corps à l'autre. *Le pouvoir émissif et le pouvoir diffusif (dans le cas de corps opaque et non réfléchissant) varient toujours en sens inverse en restant complémentaires l'un de l'autre.*



Les corps à grand pouvoir émissif, comme le noir de fumée, ont un faible pouvoir diffusif; les corps à faible pouvoir émissif, comme l'argent poli, la magnésie, ont un très grand pouvoir diffusif ou réfléchissant.

Si l'on prend comme mesure du pouvoir émissif le rapport de l'intensité de la radiation du corps considéré à celle du noir de fumée à la même température, et comme mesure du pouvoir diffusif le rapport de l'intensité de la radiation diffusée à la radiation incidente, la somme de ces deux grandeurs est égale à l'unité.

Kirchoff a démontré que dans une enceinte à température uniforme, percée d'une petite ouverture pour regarder à l'intérieur, l'intensité de chaque radiation ne dépend que de la température et est indépendante de la nature du corps. Les corps à grand pouvoir émissif, comme le noir de fumée, ont une intensité de radiation se rapprochant de celle d'une semblable enceinte sans jamais lui être supérieure.

Pour abrégé, nous appellerons corps absorbant noir ou simplement *corps noir* un corps qui aurait le même pouvoir émissif que l'enceinte précitée, et dont le pouvoir émissif sera pris comme unité.

Le pouvoir émissif d'un corps varie d'une radiation à une autre, et par suite aussi son pouvoir diffusif ou transmettant, puisque ces deux pouvoirs sont complémentaires l'un de l'autre. Il en résulte que les proportions relatives des radiations visibles, reçues ou renvoyées par un corps, ne sont pas les mêmes; par suite, les corps différents, à une même température, nous paraîtront diversement colorés.

A une même température, la couleur propre d'un corps et sa couleur apparente, quand il est éclairé avec la lumière blanche, sont complémentaires l'une de l'autre. Les corps jaunes, comme l'oxyde de zinc à

chaud, émettent une lumière bleu verdâtre. Aux températures usuelles plus petites que 2000° , les radiations rouges prédominent beaucoup et noient les inégalités des radiations des autres longueurs d'onde. Pour rendre facilement visibles les colorations des corps rayonnants, il faut les comparer à celles d'un corps noir dans les mêmes conditions de température. Un trou percé dans le corps, ou une fissure traversant la surface, donnent un très bon terme de comparaison pour juger de cette coloration.

L'intensité des radiations émises par un corps noir croît toujours avec la température, et d'autant plus rapidement que la région du spectre se rapproche du bleu; mais d'autre part, les radiations du côté du rouge commencent les premières à avoir une intensité appréciable à la vue, de telle sorte que la couleur des corps chauffés à des températures de plus en plus élevées part du rouge pour tendre vers le blanc en passant par l'orange et le jaune. Le blanc est en effet la couleur propre aux corps extrêmement chauds comme le soleil.

Les corps non noirs ont une loi d'accroissement différente de celle des corps noirs, parce que le pouvoir émissif varie avec la température. Il augmente inégalement pour les diverses radiations, de sorte que la couleur des corps, par rapport à la couleur d'un corps noir, change avec la température.

Le tableau suivant donne pour différentes couleurs le rapport des valeurs des pouvoirs émissifs de quelques corps, à celui d'un corps noir; la radiation rouge a été observée à travers un verre contenant du cuivre, la verte à l'aide d'un verre au chrome et au cuivre, la bleue à travers une dissolution ammoniacale d'hydrate cuivrique. La matière recouvrait la soudure d'un couple thermo-électrique; elle était sillonnée par des fissures,



et c'est l'éclat du fond de ces fissures qui a été comparé à celui de la surface.

	R. rouge	R. verte	R. bleue	
Magnésie	{ à 1300°	0,10	0,15	0,20
	{ à 1550°	0,30	0,35	0,40
Chaux.	{ à 1200°	0,05	0,10	0,10
	{ à 1700°	0,60	0,40	0,60
Oxyde de chrome. {	à 1200°	1,00	1,00	1,00
	à 1700°	1,00	0,40	0,30
Oxyde de thorium. {	à 1200°	0,50	0,50	0,70
	à 1760°	0,60	0,50	0,35
Oxyde de cérium. {	à 1200°	0,8	1,0	1,0
	à 1700°	0,9	0,9	0,85
Mélange Auer . . . {	à 1200°	0,25	0,40	1,0
	à 1700°	0,50	0,80	1,0

L'estimation de la température, d'après les mesures des radiations, peut au moins, en théorie, se faire de trois façons différentes, en utilisant :

L'intensité totale de la radiation lumineuse ;

L'intensité d'une radiation de longueur d'onde déterminée ;

L'intensité relative des radiations de longueurs d'onde déterminées.

Mesure de l'intensité totale de la radiation. — L'éclat des corps augmente très rapidement avec la température. On peut à la vue estimer comparativement cet éclat, mais cette mesure est très incertaine faute de points de repère. La sensibilité de l'œil varie, en effet, avec les individus, avec la lumière dans laquelle l'œil s'est trouvé préalablement, et avec la fatigue qui en résulte. On ne peut pas non plus employer de procédés photométriques précis par comparaison avec une source étalon, à cause du changement de nuance avec la température.

Le procédé suivant pourrait être essayé : tracer sur une surface blanche, diffusante ou translucide, des traits d'intensité et de dimensions déterminées, et chercher quelle fraction de la lumière il faut employer pour cesser de voir la distinction des traits. Les indications seront encore assez variables et dépendront du degré de fatigue de l'œil.

On peut donc dire qu'il n'existe actuellement pour l'estimation des températures aucune méthode définie basée sur l'appréciation de l'intensité totale des radiations visibles.

Mesure de l'intensité d'une radiation simple. — On peut estimer la température d'un corps d'après l'intensité d'une de ses radiations pourvu que l'on connaisse le pouvoir émissif du corps à cette température et la loi de variation de cette radiation repérée par rapport au thermomètre à air.

Le pouvoir émissif varie avec la température, et il n'est généralement pas connu. Il semblerait que cela dût faire rejeter cette méthode et les méthodes semblables par radiation. Il n'en est rien pour les raisons suivantes :

1° Aux températures supérieures à la fusion du platine, il n'y a pas d'autres méthodes pyrométriques applicables ;

2° Un grand nombre de corps ont un pouvoir émissif considérable, voisin de l'unité, et particulièrement des corps très intéressants industriellement, comme le fer et le charbon ;

3° La loi de variation du rayonnement avec la température est assez rapide pour que les erreurs commises en négligeant le pouvoir émissif soient faibles. Ainsi, à 1 000°, le rayonnement de la radiation rouge émise par



le charbon quadruple pour un intervalle de 100° ; il double à 1500° pour le même intervalle de température.

Or, en dehors de quelques corps exceptionnellement blancs, les pouvoirs émissifs aux températures élevées sont supérieures à 0,5. En les prenant égaux à 0,75, on ne commettra, au plus, qu'une erreur de 50° à 25° pour les températures usuelles comprises entre 1000° et 1500 .

Pyromètre optique de M. H. Le Chatelier. — Ed. Becquerel avait proposé, en 1864, de ramener la mesure des températures élevées à la mesure de l'intensité des radiations rouges émises par les corps incandescents ; mais cette méthode n'avait jamais été réalisée d'une façon complète, et encore moins employée. M. Le Chatelier, reprenant la question, a établi un dispositif expérimental approprié à ces mesures et déterminé la *loi de radiation* des corps en fonction de la température.

Photomètre. — Pour ces mesures, il faut un appareil photométrique qui permette, non pas comme les photomètres usuels de mesurer l'éclairement total produit par une source, éclairement qui varie avec les dimensions de cette source, mais l'éclat intrinsèque de chaque unité de surface. On peut employer un photomètre reposant sur un principe dû à M. Cornu.

L'appareil (fig. 32 et 33) consiste essentiellement en une lunette qui porte fixée latéralement une petite lampe de comparaison. L'image de la flamme de cette lampe est projetée sur un miroir à 45° placé au foyer principal de la lunette. On ramène à l'égalité d'intensité les images de l'objet qu'on vise et de la flamme de comparaison, qui se trouvent ainsi juxtaposées.

La lunette comprend un objectif en avant duquel se

PYROMÈTRE A RADIATION LUMINEUSE

trouve un œil-de-chat qui permet de faire varier l'ouverture utile de cet objectif, et au delà une monture destinée à recevoir des verres absorbants foncés.

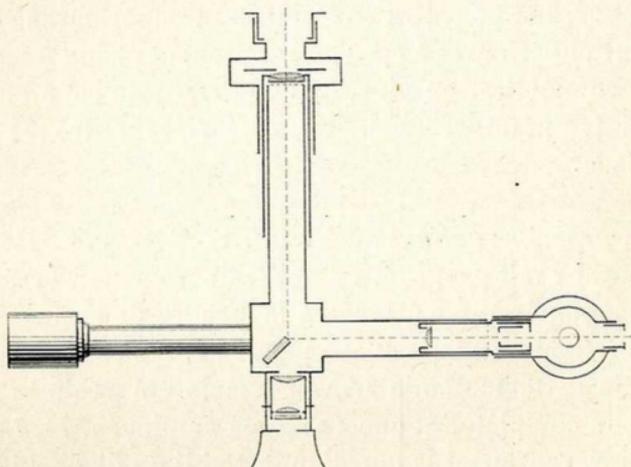


Fig. 32.

Au foyer de l'objectif se trouve un miroir à 45° M qui

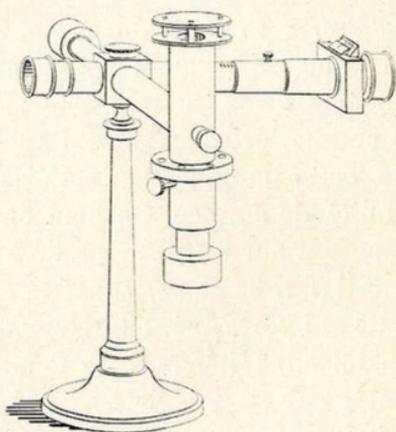


Fig. 33.

réfléchit l'image de la lampe projetée par une lentille intermédiaire. Un oculaire, devant lequel est placé

à poste fixe un verre monochromatique, sert à observer les images de la flamme et de l'objet.

Contre la lampe est fixé un diaphragme rectangulaire qui arrête les rayons lumineux non utilisés et qui porte une monture destinée à recevoir des verres absorbants foncés.

L'arête de miroir à 45° est dans le plan de l'image de la source étudiée, de telle sorte que l'image réfléchie et l'image directe sont juxtaposées, séparées seulement par l'arête du miroir. Ce miroir, d'après un procédé imaginé par M. Cornu, est formé par une lame de verre noir coupée au diamant, ce qui donne une arête très fine.

Pour faire varier l'intensité relative des images, on emploie donc simultanément des verres foncés placés devant l'un ou l'autre des deux objectifs, et l'œil-de-chat précité. Une vis permet de faire varier l'ouverture de cet œil-de-chat, et une graduation convenable indique les dimensions de cette ouverture.

Il est très important que les verres foncés aient un pouvoir absorbant aussi régulier que possible et ne présentent pas de bandes d'absorption. On y arrive avec les verres fumés de fabrication ancienne (CuO , Fe^2O^3 , MnO^2) ; on emploie aujourd'hui pour la fabrication de ces verres les oxydes de nickel et de cobalt qui donnent des bandes d'absorption.

Pour déterminer le pouvoir absorbant de ces verres, on fait une mesure avec et sans l'un d'eux ; le rapport du carré des ouvertures de l'œil-de-chat donne le pouvoir absorbant.

Comme écrans monochromatiques, on peut employer :

1° Le verre rouge au cuivre qui laisse passer $\lambda = 659$ environ. C'est celui qui est préférable, parce qu'il est plus monochromatique et qu'il permet de faire des

mesures à basse température, les premières radiations émises étant rouges ;

2° Le verre vert ($\lambda = 546$ environ). Les mesures sont alors plus faciles que dans le rouge, mais elles ne peuvent commencer qu'à des températures plus élevées ;

3° La liqueur ammoniacale d'oxyde de cuivre ($\lambda = 640$ environ).

L'emploi de ce dernier écran, qui est peu monochromatique, est sans intérêt ; l'œil est peu sensible aux radiations bleues, et celles-ci ne deviennent un peu intenses qu'aux températures élevées.

Réglage de l'appareil. — Il y a, dans l'appareil, deux parties qui exigent un réglage très soigné pour assurer son bon fonctionnement, et doivent, par suite, pouvoir être modifiées pour obtenir le résultat voulu.

1° Le faisceau lumineux provenant de la lampe qui est réfléchi par le miroir et celui qui vient directement de l'objet visé doivent pénétrer intégralement dans l'œil. Cette condition est remplie si les images des deux objectifs données par l'oculaire se superposent entre elles.

On le vérifie en visant avec une loupe ces deux images qui viennent se former un peu en arrière de l'anneau oculaire. Il faut, bien entendu, pour les rendre visibles, éclairer les deux objectifs, l'un avec la lampe, l'autre avec une source lumineuse quelconque. Si la superposition n'existe pas, on le rétablit par tâtonnement en agissant sur les vis qui fixent le miroir. S'il ne reçoit pas de chocs, l'appareil doit rester indéfiniment réglé ;

2° La lampe de comparaison demande, pour donner une lumière constante, certaines précautions. Autant que possible, il faut toujours employer la même essence

de pétrole. La flamme doit avoir une hauteur constante, égale, par exemple, à la fenêtre du diaphragme rectangulaire placé devant la flamme. Son image doit être exactement coupée en deux par l'arête du miroir, résultat qu'on obtient en faisant tourner la lampe dans sa monture qui est excentrée (fig. 34).

Il faut enfin, avant de faire une mesure, attendre une dizaine de minutes que la lampe ait pris un échauffement normal; c'est alors seulement que la flamme présente un éclat constant.

Mesures. — Pour faire une mesure, on vise un corps pris comme étalon, soit la flamme d'une bougie stéarique, soit la flamme d'une lampe à essence; on note :

1° n_0 , le nombre des verres absorbants;

2° d_0 , l'ouverture de l'œil-de-chat;

3° f_0 , le tirage de l'objectif pour la mise

au point.

On procède de même pour la source à étudier, et on trouve les nombres n_1 , d_1 , f_1 .

k étant le coefficient d'absorption des verres foncés, on a :

$$\frac{I}{I} = \frac{1}{k}^{(n_1 - n_0)} \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^2.$$

Pour les verres actuels, le coefficient d'absorption a les valeurs suivantes :

$$k = \frac{1}{11} \text{ correspondant à } \lambda = 659$$

$$k = \frac{1}{7} \quad \text{—} \quad \lambda = 546$$

$$k = \frac{1}{10} \quad \text{—} \quad \lambda = 460$$

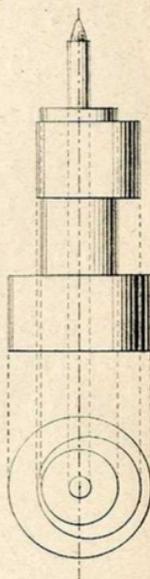


Fig. 34.

Pour les objets très petits que l'on doit voir de très près, on place un objectif supplémentaire en avant de la lunette : l'objet est placé au foyer principal de cette nouvelle lentille, l'objectif de l'appareil étant laissé réglé sur l'infini. On comptera $\frac{1}{10}$ pour le pouvoir absorbant supplémentaire de cet objectif.

Détails d'une expérience. — La première opération à faire sera la détermination du coefficient d'absorption des verres absorbants. Pour cela, on visera un objet d'intensité appropriée en interposant ou non le verre foncé devant l'œil-de-chat. Soient N l'ouverture de l'œil-de-chat sans verre foncé et N' l'ouverture avec un semblable verre. Le coefficient d'absorption K sera :

$$K = \left(\frac{N'}{N} \right)^2$$

Les expériences suivantes nous ont permis de déterminer les pouvoirs absorbants de différents verres employés au cours d'études relatives à la radiation des manchons à incandescence.

VERRE ABSORBANT PLACÉ DEVANT LA SOURCE
A ÉTUDIER

TEMPÉRATURE	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT		
	Rouge.	Vert.	Bleu.
1270° (+ 1 verre)	19,5	21,2	35
1270° (sans verre)	5,5	7,9	11,1
	$k_r = 12,5$	$k_v = 7,2$	$k_b = 9,9$

VERRE ABSORBANT PLACÉ DEVANT LA LAMPE ÉTALON

TEMPÉRATURE	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT		
	Rouge.	Vert.	Bleu.
1 170° (— 1 verre)	2,9	5,95	10,2
1 170° (sans verre)	9,4	16,1	31,5
	$k_r = 10,5$	$k_v = 7,3$	$k_b = 9,5$

Pouvoir émissif. — Avant de pouvoir établir la relation qui existe entre l'intensité de la radiation des corps incandescents et leur température, il faut connaître le pouvoir émissif de ces corps. Pour cette mesure, on utilise la remarque précédemment faite que l'intérieur des fissures d'un corps peut être considéré comme renfermé dans une enveloppe de température uniforme. Le pouvoir émissif est donc, à la température considérée, égal au rapport de l'intensité lumineuse de la surface à celle du fond des fissures profondes, sous la réserve, bien entendu, que l'ouverture des fissures soit assez petite.

Le corps à étudier était placé à l'état de pâte, aussi sèche que possible, sur l'extrémité du couple préalablement aplatie, de manière à prendre la forme d'un disque de 2 à 3 millimètres de diamètre. On séchait très lentement afin qu'il n'y eût pas boursoufflement de la masse, et on obtenait ainsi un enduit présentant des fissures ; on se trouvait donc dans les conditions indiquées plus haut. L'extrémité du couple ainsi préparé était chauffée soit avec un bec Bunsen, soit avec le chalumeau oxydrique, et tandis que d'un côté, on notait

la température à laquelle la soudure était portée, de l'autre, on visait avec le pyromètre optique. Pour obtenir une température aussi constante que possible, il faut se mettre à l'abri des courants d'air et employer une flamme un peu volumineuse.

Voici quelques résultats obtenus :

I. — COUPLE RECOUVERT DU MÉLANGE CONTENANT
99 PARTIES DE THORIUM ET 1 DE CÉRIUM

TEMPÉRATURES	ROUGE		VERT		BLEU	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
950° (— 1 verre)	16,0	»	21,0	14,0	23,0	»
1170°	15,5	9,0	11,0	9,0	12,0	12,0
1375°	7,0	3,0	4,5	3,2	3,5	3,5
1525°	3,2	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9
1650° (+ 1 verre)	8,3	6,0	5,0	»	4,0	»

II. — MAGNÉSIE

TEMPÉRATURES	ROUGE		VERT		BLEU	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
1340° (— 1 verre)	12,2	4,0	18,5	6,7	19,0	9,0
1460° (— 1 verre)	4,9	2,5	8,2	3,1	7,7	4,1
1540° (— 1 verre)	2,4	1,3	3,1	1,8	3,2	2,1

Les nombres donnent les divisions de l'œil-de-chat; ceux de la colonne (1) sont relatifs à la surface et ceux de la colonne (2) au fond des fissures. Les indications — 1 verre et + 1 verre signifient que le verre absorbant est placé, soit devant la lampe étalon, soit devant la source étudiée.



Mesures d'intensité. — Le tableau suivant donne une idée de l'ordre de grandeur des intensités de différentes sources lumineuses, les mesures d'éclat ayant été faites dans le rouge. L'unité est l'éclat de la partie axiale d'une flamme de bougie stéarique.

Charbon s'allumant, rouge naissant (600°)	0,0001
Argent fondant (950°).	0,015
Bougie stéarique.	1
Bougie gaz	
Lampe acétate d'amyle.	
Lampe Pigeon, à essence minérale.	1,1
Bec Argand, avec verre.	1,9
Bec Auer.	2,05
Fe ³ O ₃ fondant (1350°)	2,25
Palladium fondant (1550°).	4,8
Platine fondant (1780°)	15
Lampe à incandescence.	40
Cratère de l'arc électrique	10 000
Soleil à midi.	90 000

Graduation. — M. Le Chatelier a fait une première graduation du pyromètre optique, en mesurant l'éclat d'oxyde de fer chauffé sur la soudure d'un couple thermo-électrique, et en admettant que, pour le rouge, le pouvoir émissif de ce corps est égal à l'unité. Il a trouvé une loi de variation de l'intensité des radiations rouges en fonction de la température, qui est bien représentée par la formule :

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

dans laquelle l'unité d'intensité correspond à la région axiale la plus brillante de la flamme d'une bougie. (T est la température absolue.)

Le tableau ci-dessous donne, de 100° en 100°, l'intensité des radiations rouges émises par les corps d'un pouvoir émissif égal à l'unité. Ces nombres ont été cal-

culés au moyen de la formule d'interpolation donnée plus haut.

Intensités.	Températures.	Intensités.	Températures.
0,00008	600°	39,0	1 800°
0,00073	700	60,0	1 900
0,0046	800	93,0	2 000
0,020	900	1 800	3 000
0,078	1 000	9 700	4 000
0,24	1 100	28 000	5 000
0,64	1 200	56 000	6 000
1,63	1 300	100 000	7 000
3,35	1 400	150 000	8 000
6,7	1 500	224 000	9 000
12,9	1 600	305 000	10 000
22,4	1 700		

Ces données sont résumées dans la courbe de la figure 35.

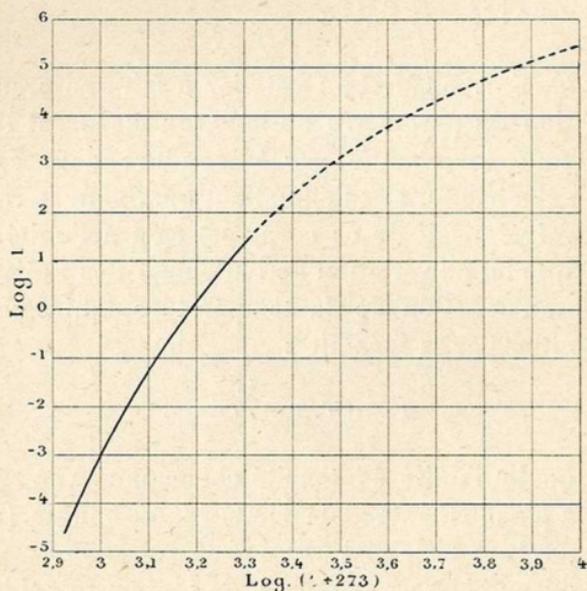


Fig. 35.

On peut, après avoir déterminé, comme il a été dit

plus haut, la valeur du diaphragme d_0 qui amène à égalité l'éclat de la flamme de la bougie étalon avec celui de la lampe de comparaison et le pouvoir absorbant k des verres foncés, dresser une table qui donne directement la température correspondant à chaque ouverture de l'œil-de-chat.

Avec un appareil pour lequel

$$d_0 = 5,2 \quad k = \frac{1}{11},$$

on obtient la table suivante, dans laquelle on a affecté du signe + les verres foncés placés devant l'objectif, et du signe - ceux placés devant la lampe.

TEMPÉRATURES	OUVERTURE DE L'ŒIL-DE-CHAT				
	- 2 verres.	- 1 verre.	0 verre.	+ 1 verre.	+ 2 verres
degrés.					
700	17,3	»	»	»	»
800	6,9	23,0	»	»	»
900	»	11,0	»	»	»
1 000	»	5,6	18,6	»	»
1 100	»	»	10,5	»	»
1 200	»	»	6,5	»	»
1 300	»	»	4,0	13,6	»
1 400	»	»	»	9,4	»
1 500	»	»	»	6,6	»
1 600	»	»	»	4,8	»
1 700	»	»	»	3,6	12,0
1 800	»	»	»	»	9,1
1 900	»	»	»	»	7,3
2 000	»	»	»	»	5,9

Cette graduation s'applique à tous les corps placés dans une enceinte de même température, à l'intérieur des fours par exemple, et aux corps noirs, quelle que soit la température de l'enceinte qui les environne, par exemple à un morceau de fer rouge exposé à l'air libre. Pour les corps dont le pouvoir émissif est inférieur à

l'unité comme le platine, la magnésie, la chaux, il faut, lorsqu'ils sont exposés à l'air libre et ne sont plus renfermés dans une enceinte de même température, faire une graduation spéciale.

MM. Le Chatelier et Boudouard ont fait une série de mesures sur des radiations de longueurs d'ondes différentes. La soudure d'un couple thermo-électrique était placée dans un petit tube de platine, pour se rapprocher d'une enceinte close. En prenant comme unité l'éclat du platine fondant, les résultats trouvés ont été les suivants pour les radiations rouges, vertes et bleues :

t	Log (t + 273).	I_r	Log I_r	I_v	Log I_v	I_b	Log I_b
900	3,0707	0,0009	$\overline{4},95$	0,00018	$\overline{4},25$	0,00002	$\overline{5},3$
1 180	3,161	0,0024	$\overline{3},88$	0,0087	$\overline{3},94$	0,0015	$\overline{3},17$
1 275	3,190	0,075	$\overline{2},78$	0,037	$\overline{2},57$	0,013	$\overline{2},11$
1 430	3,230	0,23	$\overline{1},36$	0,16	$\overline{1},20$	0,058	$\overline{2},76$
1 565	3,265	0,72	$\overline{1},86$	0,47	$\overline{1},67$	0,24	$\overline{1},38$
1 715	3,300	1,69	0,23	1,45	0,16	0,9	0,95

Evaluations de températures. — Enfin M. Le Chatelier a employé son pyromètre optique pour déterminer les températures les plus élevées réalisées dans quelques-uns des phénomènes les plus importants de la nature ou de l'industrie. Les résultats assez différents des estimations faites antérieurement furent d'abord accueillis avec un certain scepticisme ; ils sont aujourd'hui admis comme exacts au moins dans les limites de précision qu'ils comportent. Voici quelques-uns de ces chiffres :

Fours Siemens-Martin	1 490 à 1 580
Fours de verrerie	1 375 à 1 400
Fours à porcelaine dure	1 370
— nouvelle	1 250



Lampe à incandescence	1 800
Lampe à arc	4 100
Soleil.	7 600

Cette détermination de la température du Soleil a été confirmée par les expériences plus récentes de MM. Wilson et Gray par une méthode toute différente (p. 151).

Une série de mesures ont été faites avec le même appareil dans les usines à fer. Voici quelques résultats.

Haut fourneau pour fonte Bessemer.

Creuset devant les tuyères	1 930°
Coulée de la fonte. Commencement.	1 400
— — Fin.	1 520

Cornue Bessemer.

Coulée de la scorie.	1 580
Coulée de l'acier dans la poche	1 640
— dans les lingotières.	1 580
Réchauffage du lingot.	1 200
Fin du martelage.	1 080

Fours Siemens-Martin.

Coulée de l'acier dans la poche. Commencement	1 580
Coulée de l'acier dans la poche. Fin.	1 420
Coulée dans les moules.	1 490

Conditions d'emploi. — Le pyromètre optique, en raison de l'incertitude sur les pouvoirs émissifs, du peu de sensibilité de l'œil pour les comparaisons d'intensité lumineuse, ne peut pas conduire à des résultats aussi précis que les autres méthodes pyrométriques. Son emploi doit être limité aux cas où ces autres méthodes se trouvent nécessairement en défaut ; par

exemple, dans le cas de corps en mouvement comme un rail passant au laminoir ; dans le cas de températures très élevées supérieures à la fusion du platine comme celle du creuset du haut fourneau ou celle du four électrique ; dans le cas de corps isolés rayonnant librement dans l'air comme des flammes carbonées ou des fils chauffés par le courant électrique que l'on ne pourrait toucher sans modifier leur température.

Elle est encore commode dans le cas de fours fortement chauffés comme les fours à acier, à porcelaine. Mais pour cet usage il faut se garder contre l'éclat des flammes toujours plus chaudes que le four et contre les rentrées d'air froid. Le dispositif du tube fermé indiqué à propos du pyromètre à radiation calorifique est indispensable si l'on veut arriver à des résultats à peu près exacts. Comparativement à ce dernier pyromètre, le pyromètre optique a l'avantage d'être beaucoup plus simple et moins coûteux, de n'exiger aucune installation préalable à poste fixe. Il a, par contre, l'inconvénient d'exiger une intervention plus active de l'opérateur et de pouvoir difficilement être confié à un ouvrier, tandis que l'on conçoit une organisation du pyromètre à radiation calorifique telle que toute l'observation se réduise à une lecture sur un cadran.

Mesure de l'intensité relative de radiations différentes. — C'est sur ce principe que repose l'estimation à l'œil des températures telle que la font les ouvriers dans les usines. De nombreuses tentatives, peu heureuses d'ailleurs, ont été faites pour transformer cette méthode et lui donner de la précision. Il n'y a lieu de s'en occuper qu'au point de vue du contrôle sommaire de la marche des fours dans l'industrie.

a. *Emploi de l'œil.* — Pouillet a fait un repérage de

la couleur des corps incandescents par rapport au thermomètre à air. Le tableau qu'il a dressé se trouve aujourd'hui encore reproduit partout :

Rouge naissant. . .	525°	Orange foncé. . .	1100°
— sombre . . .	700	— clair . . .	1200
Cerise naissant. . .	800	Blanc	1300
— pp. dit . . .	900	— soudant . . .	1400
— clair . . .	1000	— éblouissant.	1500

L'estimation de ces nuances, très arbitraire, varie d'une personne à l'autre; bien plus, elle varie pour une même personne avec l'éclairement extérieur. Le jour et la nuit, les nuances sont différentes : c'est ainsi que la flamme du gaz, jaune pendant le jour, paraît blanche la nuit.

b. *Emploi du verre de cobalt.* — On peut exagérer les changements de nuance en supprimant du spectre les radiations centrales, le jaune et le vert par exemple, pour ne conserver que le rouge et le bleu. Les variations relatives de deux nuances sont d'autant plus grandes qu'elles sont plus éloignées dans le spectre; or, le rouge et le bleu forment les deux extrémités du spectre visible.

On a proposé dans ce but l'emploi du verre de cobalt qui arrête le jaune et le vert, mais laisse passer le rouge et le bleu. Il faut remarquer tout d'abord que le rapport des radiations transmises varie avec l'épaisseur du verre, en même temps que leur intensité absolue.

Soient I_a et I_b les intensités des radiations émises, k_a et k_b les proportions transmises par le verre à travers une épaisseur 1. A travers une épaisseur e , la proportion transmise sera

$$\frac{I_a k_a^e}{I_b k_b^e}$$

qui variera avec e toutes les fois que k_a sera différent de k_b .

Il en résulte que deux verres de cobalt, différant comme épaisseur ou teneur en cobalt, ne donneront pas les mêmes résultats. Si donc on casse son verre habituel, tout l'apprentissage de l'œil qu'il a fallu faire sera perdu.

En outre, le cobalt a l'inconvénient de ne pas avoir un assez grand pouvoir absorbant pour le rouge, qui prédomine aux températures les plus usuelles que nous produisons. Il serait possible, sans doute par addition d'oxyde de cuivre, d'augmenter le pouvoir absorbant pour le rouge.

On aurait des résultats meilleurs et plus comparables en employant des solutions de sels métalliques ou de composés organiques convenablement choisis. Mais peu d'essais ont été faits dans cette voie.

Lunette de MM. Mesuré et Nouel. — On sait qu'en plaçant entre deux nicols une lame de quartz perpendiculaire à l'axe on supprime un certain nombre des radiations du spectre. Celui-ci est alors composé de bandes sombres dont l'espacement dépend de l'épaisseur du quartz et la position de l'angle des nicols. MM. Mesuré et Nouel ont utilisé ce principe pour supprimer les parties centrales du spectre; cette solution est excellente et préférable à l'emploi des milieux absorbants. L'appareil comprend essentiellement (fig. 36) un polariseur P et un analyseur A dont le réglage à l'extinction donne le zéro de la graduation du cercle divisé C C. Ce cercle est divisé en degrés et est mobile devant un index fixe I. Entre les deux nicols P et A, se trouve un quartz Q, d'épaisseur convenable, bien calibré. La monture M permet son enlèvement rapide, si on avait à vérifier le

réglage des nicols P et A. Le quartz Q est taillé perpendiculairement à l'axe.

Une loupe L vise l'ouverture opposée C garnie d'une glace parallèle, ou à volonté, d'un verre diffusant dépoli très doux.

Les proportions relatives de divers rayons qu'émet

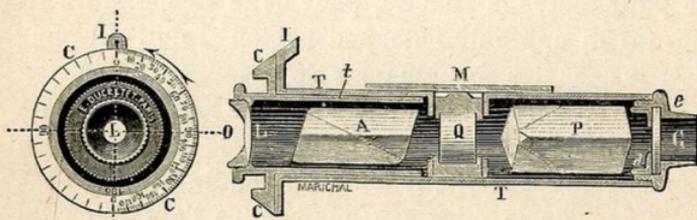


Fig. 36.

un corps incandescent variant avec la température, il s'ensuivra que, pour une position donnée de l'analyseur A, la teinte composée obtenue sera différente suivant cette température.

Lorsqu'on fait tourner l'analyseur pendant que l'on regarde un corps lumineux donné, on constate que les variations des colorations sont beaucoup plus rapides dans une position déterminée de l'analyseur. Une très faible rotation fait brusquement passer la coloration du rouge au vert. Or, si on laisse l'analyseur fixe, une faible variation de la température du corps incandescent produit le même effet. La teinte transitoire rouge-vert constitue ce que l'on appelle la teinte sensible. Il y a alors deux bandes d'absorption, une dans le jaune et une dans le violet.

On peut employer cet appareil de deux façons différentes. Ou bien fixer d'une façon invariable l'analyseur dans une position qui donne la teinte sensible pour la température que l'on a le plus d'intérêt à surveiller et

observer les changements de nuances qui se produisent quand la température viendra à s'écarter de la température type dans un sens ou dans l'autre. C'est le mode normal d'emploi de cet appareil. On veut dans une fabrication donnée (verre, acier) s'assurer que la température des fours reste bien toujours la même, on réglera une fois pour toutes la lunette, pour cette température. Il suffira d'un apprentissage peu prolongé de l'œil pour saisir le sens des changements de nuances.

Les inventeurs ont cherché à faire de leur appareil un instrument de mesure ; cette idée est très discutable. En théorie, cela est facile, il suffit, au lieu de laisser l'analyseur fixe, de le faire tourner jusqu'à l'obtention de la teinte sensible et de noter l'angle qui définit la position de l'analyseur. Mais en fait, la nuance sensible n'est pas rigoureusement déterminée et varie suivant les observateurs. Une graduation faite par un observateur ne sera pas bonne pour un autre. Il n'est même pas sûr que le même observateur choisisse toujours de même la teinte sensible. A chaque température la teinte sensible est un peu différente, et il est impossible de conserver le souvenir dans toute l'échelle des températures des teintes que l'on a choisies le jour de la graduation. Il y a déjà une certaine difficulté à se la rappeler, pour une température unique.

Les chiffres suivants donneront une idée des écarts qui peuvent exister entre deux opérateurs sur la position de la teinte sensible.

		Angle de l'analyseur.	
		1	2
Soleil	8000°	84	86
Flamme du gaz.	1680	65	70
Platine rouge	800	40	45

Les erreurs sur l'estimation des températures qui



résulteraient de l'incertitude de la nuance sensible dépasseraient alors 100°. Avec des observateurs ayant fait un apprentissage plus prolongé, l'écart serait un peu réduit, mais il resterait toujours assez grand.

Pyromètre de M. Crova. — M. Crova a cherché à donner à la méthode d'estimation des températures reposant sur la variation inégale des diverses radiations du spectre une précision scientifique en mesurant l'intensité absolue de chacune des deux radiations utilisées; mais cette méthode, au point de vue pratique, ne semble pas avoir donné de résultats plus exacts que les précédentes.

L'œil est beaucoup moins sensible aux différences d'intensité qu'aux différences de nuance, de sorte qu'il n'y a aucun avantage à passer par des mesures d'intensité.

M. Crova compare deux radiations

$$\lambda = 676 \text{ (rouge)}$$

$$\lambda = 513 \text{ (vert)}$$

venant de l'objet étudié et d'une lampe à huile servant d'étalon. Pour cela, au moyen d'un diaphragme variable, il amène à égalité l'une des deux radiations émanant de chacune des sources, et mesure ensuite le rapport des intensités de l'autre radiation.

L'appareil est un spectrophotomètre. Devant la moitié de la hauteur de la flamme se trouve un prisme à réflexion totale qui renvoie la lumière d'un verre dépoli éclairé par les radiations d'une lampe à huile ayant au préalable traversé deux nicols et un diaphragme d'une ouverture variable. Sur l'autre moitié de la fente, on projette avec une lentille l'image du corps étudié.

Avant d'employer l'appareil, il faut régler les limites

extrêmes du déplacement du spectre de façon à projeter successivement sur la fente, au foyer de l'oculaire, les deux radiations choisies ($\lambda = 676$ et $\lambda = 523$). Pour cela, on interpose entre les deux nicols croisés un quartz de 4 millimètres qui rétablit l'éclairement; pour éteindre à nouveau, on doit faire tourner l'analyseur de $115^{\circ}38'$ pour $\lambda = 523$, et de $65^{\circ}52'$ pour $\lambda = 676$. On règle alors l'excursion extrême de la lunette de façon à ce que la bande sombre produite par le quartz arrive au milieu de la fente oculaire.

L'appareil ainsi réglé, pour faire une mesure aux basses températures, inférieures à celles du charbon brûlant dans la lampe étalon, on amène à égalité la radiation rouge avec le diaphragme, puis sans toucher de nouveau au diaphragme, on ramène le vert à l'égalité en faisant tourner le nicol.

Le degré optique est donné par la formule $N = 1000 \cos^2 \alpha$, en désignant par α l'angle des deux sections principales des nicols.

Pour les températures plus élevées, on reverse l'opération; on amène d'abord le vert à l'égalité par le diaphragme, puis le rouge à l'égalité par une rotation de l'analyseur. Le degré optique est alors donné par la formule $N = \frac{1000}{\cos^2 \alpha}$, et la rotation variant de 0° à 90° , les degrés optiques varient de 1000° à l'infini.

Cette méthode, qui est excellente au point de vue théorique, présente de graves inconvénients au point de vue pratique :

1° Défaut de précision des mesures. En admettant une erreur de 10 p. 100 sur chacune des mesures relatives aux radiations rouge et verte, l'erreur totale possible sera de 20 p. 100; or, entre 700° et 1500° , les rapports d'intensités varient de 1 à 5; cela conduit à un écart de $\frac{1}{25}$ sur 800° , soit 32° .

2° Complication et lenteur des expériences. Il est difficile d'arriver à viser exactement le corps ou le point du corps que l'on veut étudier. La mise en expérience et l'achèvement des mesures demande parfois près d'une demi-heure.

3° Absence de repérage par rapport au thermomètre à air.

Le motif *a priori* qui avait conduit à l'étude de cette méthode était la supposition, qu'en général, le pouvoir émissif des corps était le même pour toutes les radiations, et que par suite, son influence disparaîtrait en prenant le rapport des intensités des deux radiations. Les mesures du pouvoir émissif données plus haut prouvent que cette hypothèse est le plus souvent inexacte.

CHAPITRE IX

PYROMÈTRE PAR RETRAIT (WEDGWOOD)

Le pyromètre de Wedgwood, le plus ancien en date parmi les instruments semblables, ne présente plus guère aujourd'hui qu'un intérêt historique, car son emploi a été presque partout abandonné. Il utilise le retrait permanent que prennent les matières argileuses sous l'influence d'une température élevée.

Ce retrait est variable suivant la nature chimique de la pâte, la grosseur des éléments, la compacité de la pâte humide, la durée du chauffage, etc. Pour avoir des résultats comparables, il faudrait préparer *simultanément, dans les mêmes conditions*, une grande quantité de cylindres, dont on ferait un repérage par rapport au thermomètre à air. Wedgwood employait des cylindres d'argile réfractaire, cuits jusqu'à déshydratation, soit 600°; cette cuisson préalable est indispensable, si l'on veut éviter l'éclatement, quand on les soumet à l'action brusque du feu. Ces cylindres présentent une face plane, sur laquelle on les appuie dans l'appareil de mesure de façon à les présenter toujours dans le même sens (voir la figure en tête du volume). Le retrait est mesuré au moyen d'une jauge formée de deux parois inclinées; deux jauges semblables de 6 pouces de long se faisant suite sont placées l'une à côté de l'autre; à une extrémité, elles ont un écart maximum

de $\frac{5}{10}$ de pouce, et à l'autre un écart minimum de $\frac{3}{10}$ de pouce. Longitudinalement, les divisions ont $\frac{1}{20}$ de pouce ; chaque division vaut $\frac{1}{240}$ de $\frac{2}{10}$ de pouce, soit $\frac{1}{1200}$ de pouce, ce qui correspond à un retrait relatif par rapport à la dimension primitive de $\frac{1}{1200} : \frac{5}{10} = \frac{1}{600}$.

On a donc la corrélation suivante entre les degrés Wedgwood et le retrait linéaire par unité de longueur.

Wedgwood	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Retrait	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40

M. H. Le Chatelier a fait des expériences pour repérer les degrés du pyromètre Wedgwood par rapport à l'échelle du thermomètre à air en employant des matières argileuses de nature différente, et tout d'abord des cylindres provenant d'un vieux pyromètre Wedgwood de l'École des Mines. La contraction qui accompagne la déshydratation est assez variable avec la nature des pâtes. Dans ces expériences la durée du chauffage a été d'une demi-heure.

Température centigrade	600°	800°	1000°	1200°	1400°	1550°
Wedgwood	0	4	15	36	90	132
Argile de Mussidan	0	2	14	36	78	120
Porcelaine de Limoges	0	0	2	21	88	91
Faïence de Choisy-le-Roi	0	2	5	12	48	75
Faïence de Nevers	0	0	0	32	fondue	»
Kaolin	0	4	12	15	55	118
Argile	25					
Acide titanique	75	0	4	9	19	123
						160

On voit combien les indications sont variables ; il est impossible, par suite, de repérer les vieilles mesures de Wedgwood et de ses successeurs, parce que la fabrication des cylindres a varié avec les époques.

Wedgwood avait donné une graduation faite par un procédé d'extrapolation qu'il n'a pas indiqué, graduation d'après laquelle il attribuait 10 000° centigrades à 130° de son pyromètre, qui correspondent environ à 1 550°. On pourrait encore chercher à rétablir la graduation en utilisant les déterminations des points de fusion des métaux faites par Wedgwood, mais les résultats sont trop discordants pour conduire à aucune conclusion bien nette. D'après Wedgwood, le cuivre serait plus fusible que l'argent, le fer ne serait pas très éloigné de l'argent; il est probable que ces expériences ont porté sur des métaux très impurs, ou tout au moins sur des métaux notablement oxydés avant leur fusion. En tout cas les cylindres qui lui ont servi dans ses premières expériences prenaient un retrait plus grand que ceux du pyromètre de l'École des Mines dont la graduation a été donnée plus haut. On pourrait dubitativement indiquer la graduation suivante pour les mesures faites avec les premiers cylindres employés vers 1780.

Degrés Wedgwood.	0	15	30	100	140
Degrés centigrades.	600	800	1 000	1 200	1 400

La préparation des cylindres était une opération très minutieuse. Moulés en pâte molle ils étaient nécessairement un peu irréguliers. Il fallait après la première cuisson les retoucher pour les amener à une dimension bien uniforme. On obtient aujourd'hui, dans les quelques usines à faïence où ce procédé est encore employé, une régularité bien plus grande en se servant d'une pâte très sèche, 5 p. 100 d'eau par exemple, la moulant sous une forte pression, une centaine de kilogrammes environ par centimètre carré, dans des moules en acier tourné. On augmente la précision des mesures, en augmentant le diamètre, à 50 millimètres par exemple. Il faut en

même temps réduire l'épaisseur à 5 millimètres environ, pour que la compression soit uniforme dans toute la masse.

Cet appareil ne saurait dans aucun cas être recommandé comme un véritable pyromètre, pouvant servir indirectement à évaluer les températures par rapport à l'échelle du thermomètre à air. La graduation en est pénible et ne peut être faite que par l'intermédiaire d'un autre pyromètre ; l'emploi des points fixes ne conviendrait pas pour cette graduation parce que la courbe de retrait de l'argile en fonction de la température est trop irrégulière pour que deux ou trois points suffisent à la déterminer ; dans aucun cas les indications de cet appareil ne présentent une précision notable.

Mais comme simple pyroscope, c'est-à-dire comme appareil destiné à indiquer seulement l'égalité ou l'inégalité de deux températures, le pyromètre de Wedgwood peut être très commode. Il a l'avantage de ne coûter presque rien et il est d'un emploi très simple, à la portée de n'importe quel ouvrier. Il semble particulièrement recommandable pour certaines industries céramiques, dans lesquelles les pâtes courantes de service peuvent servir à confectionner les pièces de retrait. Il faut pour cela que la cuisson normale de ces pâtes s'arrête à une température comprise dans la période de retrait rapide. C'est le cas de la faïence fine et des terres cuites ordinaires. Cela ne conviendrait pas au contraire pour la faïence stannifère ni pour la porcelaine, parce que la cuisson de la première s'arrête avant le commencement du retrait et celle de la seconde après son achèvement.

CHAPITRE X

MONTRES FUSIBLES (SEGER)

On a depuis longtemps songé à repérer les températures au moyen des points de fusion de certains métaux et alliages. Mais les métaux non oxydables sont peu nombreux et tous très coûteux : l'argent, l'or, le palladium, le platine. On a cependant employé parfois ces métaux et leurs alliages, en admettant que le point de fusion d'un mélange de deux corps est la moyenne arithmétique des points de fusion des composants, ce qui est tout à fait inexact. L'emploi de ces alliages est avec raison complètement abandonné aujourd'hui.

On pourrait, en s'adressant aux sels métalliques, dont un très grand nombre peuvent être chauffés sans altération constituer une échelle de points de fusion dont l'emploi serait souvent très commode ; mais ce travail n'est pas encore fait, au moins d'une façon suffisamment précise. Aux sels isolés on pourrait ajouter leurs combinaisons définies et leurs mélanges eutectiques qui ont des points de fusion complètement définis. Mais on ne pourrait pas prendre un mélange quelconque de deux sels parce qu'en général la solidification se produit dans un grand intervalle de température et d'une façon progressive.

Au lieu d'utiliser la fusion de corps cristallisés qui passent brusquement de l'état solide à l'état liquide, on



peut se servir du ramollissement progressif des matières vitreuses, c'est-à-dire de mélanges renfermant un excès de l'un des trois acides silicique, borique ou phosphorique. Il est nécessaire dans ce cas d'avoir un procédé précis pour définir un degré type de ramollissement ; on prend un affaissement déterminé d'un prisme de grandeur déterminée. Ces petits prismes formés d'éléments vitreux sont connus sous le nom de *montres fusibles*.

L'idée première de cette méthode appartient à MM. Lauth et Vogt qui l'ont appliquée à la manufacture de Sèvres avant 1882. Mais ils ne lui ont pas donné tout le développement qu'elle comportait ; ils se sont contentés d'établir un petit nombre de montres fusibles correspondant aux diverses températures employées dans la fabrication de la porcelaine de Sèvres.

Seger, directeur d'un laboratoire de recherches céramiques, à la manufacture royale de Berlin, a publié, en 1886, un important mémoire sur cette question. Il a déterminé toute une série de montres fusibles espacées de 25° environ et embrassant l'intervalle de température de 600 à 1 800°. Les matières premières qui entrent dans la composition de ces montres sont essentiellement :

- Du sable quartzeux pur ;
- Du feldspath de Norvège ;
- Du carbonate de chaux pur ;
- Du kaolin de Zettlitz.

La composition de ce dernier est

SiO ²	46,9
Al ² O ³	38,6
FeO ³	0,8
Alcalis	1,1
Eau	12,7

Pour obtenir les montres très peu fusibles on ajoute de l'alumine calcinée, et pour les montres très fusibles de l'oxyde de fer, de l'oxyde de plomb, du carbonate de soude et de l'acide borique.

La forme de ces montres (fig. 37) est celle de pyramides triangulaires de 15 millimètres de côté et 50 mil-

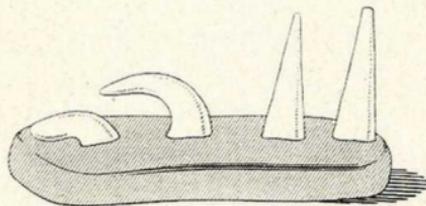


Fig. 37.

limètres de hauteur. Sous l'action de la chaleur, quand le ramollissement commence, elles se contractent d'abord sans changer de forme, puis elles s'inclinent, se courbent en laissant leur pointe se tourner vers le bas et enfin s'aplatissent complètement. On dit que la montre est tombée, c'est-à-dire est fondue, quand elle est à moitié courbée la pointe tournée vers le bas.

Le point de fusion de ces montres a été déterminé à la manufacture de porcelaine de Berlin par comparaison avec le pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier précédemment décrit.

Les montres sont numérotées, pour les moins fusibles qui ont été établies les premières, de 1 à 38 ; cette dernière, la moins fusible, correspond à 1980°. La seconde série, plus fusible, et établie postérieurement, est numérotée de 01 à 022 ; cette dernière montre, la plus fusible, correspond à 590°.

Si au lieu de se servir des montres de fabrication allemande on veut les fabriquer soi-même en employant les mêmes formules, il est prudent d'en faire une nou-



velle graduation. Les kaolins, les feldspaths de différentes provenances n'ont jamais des compositions exactement semblables, et de très faibles variations dans les teneurs en alcalis peuvent amener des changements notables dans la fusibilité, au moins pour les montres les moins fusibles.

On remarquera que dans un grand nombre de montres la silice et l'alumine sont dans les proportions $\text{Al}^2\text{O}^3 + 10\text{SiO}^2$. Cela tient à ce que ce mélange est le plus fusible que l'on puisse obtenir avec la silice et l'alumine seules. On en est parti pour obtenir les autres montres, les moins fusibles par addition d'alumine, et les plus fusibles par addition de bases alcalines.

Le tableau suivant donne la liste des montres de l'échelle de Seger (voir p. 188).

Ces montres peuvent être classées en une série de groupes dans chacun desquels les compositions des différentes montres dérivent de celle de l'une d'entre elles, généralement de la plus fusible, par addition en proportion variable ou quelquefois substitution d'une autre matière.

Les montres 28 à 38 dérivent de la montre 27 par addition de quantités croissantes d' Al^2O^3 .

Les montres 5 à 28 de la montre 5 par addition de quantités croissantes du mélange $\text{Al}^2\text{O}^3 + 10\text{SiO}^2$.

Les montres 1 à 5 de la montre 1 par substitution de quantités croissantes d'alumine au sesquioxyde de fer.

Les montres 010 à 1 de la montre 1 par substitution d'acide borique à la silice.

Les montres 022 à 011 de la montre 022 par addition de quantités croissantes du mélange $\text{Al}^2\text{O}^3 + 2\text{SiO}^2$.

La figure 38 donne la représentation graphique de ces

N ^{os}	TEMPÉRA- TURES	COMPOSITION		x	FORMULES
	degrés.				
38	1 890	1	Al ² O ³ + 1 SiO ²	9	$x \text{Al}^2\text{O}^3 + (1-x)(\text{Al}^2\text{O}^3 + 10 \text{SiO}^2)$
36	1 850	1	» + 1,5 »	8	
35	1 830	1	» + 2 »		
34	1 810	1	» + 2,5 »		
33	1 790	1	» + 3 »		
32	1 770	1	» + 4 »		
31	1 750	1	» + 5 »		
30	1 730	1	» + 6 »		
29	1 710	1	» + 8 »		
28	1 690	1	» + 10 »		
27	1 670	1	$\left\{ \begin{matrix} 0,3 \text{K}^2\text{O} \\ 0,7 \text{CaO} \end{matrix} \right\} + 20 (\text{Al}^2\text{O}^3 + 10 \text{SiO}^2)$	0	$x (\text{Al}^2\text{O}^3 + 10 \text{SiO}^2) + (1-x) \left[\begin{matrix} 0,3 \text{K}^2\text{O} \\ 0,7 \text{CaO} + 0,5 (\text{Al}^2\text{O}^3 + 10 \text{SiO}^2) \end{matrix} \right]$
26	1 650	1	» + 7,2 »	93	
25	1 630	1	» + 6,6 »		
24	1 610	1	» + 6 »		
23	1 590	1	» + 5,4 »		
22	1 570	1	» + 4,9 »		
21	1 550	1	» + 4,4 »		
20	1 530	1	» + 3,9 »		
19	1 510	1	» + 3,5 »		
18	1 490	1	» + 3,1 »		
17	1 470	1	» + 2,7 »	79	
16	1 450	1	» + 2,4 »		
15	1 430	1	» + 2,1 »		
14	1 410	1	» + 1,8 »		
13	1 390	1	» + 1,6 »		
12	1 370	1	» + 1,4 »		
11	1 350	1	» + 1,2 »		
10	1 330	1	» + 1 »		
9	1 310	1	» + 0,9 »		
8	1 290	1	» + 0,8 »	58	
7	1 270	1	» + 0,7 »		
6	1 250	1	» + 0,6 »		
5	1 230	1	» + 0,5 »		
4	1 210	1	» + 0,5 Al ² O ³ + 4 SiO ²		
3	1 190	1	» + $\left\{ \begin{matrix} 0,45 \text{Al}^2\text{O}^3 \\ 0,05 \text{Fe}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\} + 4 \text{SiO}^2$		$x (0,5 \text{Al}^2\text{O}^3 + 4 \text{SiO}^2) + (1-x)(0,5 \text{Fe}^2\text{O} + 4 \text{SiO}^2 + 0,7 \text{CaO})$
2	1 170	1	» + $\left\{ \begin{matrix} 0,4 \text{Al}^2\text{O}^3 \\ 0,1 \text{Fe}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\} + 4 \text{SiO}^2$		
1	1 150	1	» + $\left\{ \begin{matrix} 0,3 \text{Al}^2\text{O}^3 \\ 0,2 \text{Fe}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\} + 4 \text{SiO}^2$		
01	1 130	1	» + » + $\left\{ \begin{matrix} 3,95 \text{SiO}^2 \\ 0,05 \text{B}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\}$		1,05
02	1 110	1	» + » + $\left\{ \begin{matrix} 3,90 \text{SiO}^2 \\ 0,10 \text{B}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\}$		
03	1 090	1	» + » + $\left\{ \begin{matrix} 3,85 \text{SiO}^2 \\ 0,15 \text{B}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\}$		
04	1 070	1	» + » + $\left\{ \begin{matrix} 3,80 \text{SiO}^2 \\ 0,20 \text{B}^2\text{O}^3 \end{matrix} \right\}$		

Nos	TEMPÉRA- TURES	COMPOSITION				x	FORMULES	
	degrés.							
05	1 050	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 3,75 \text{ SiO}_2 \\ 0,25 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$	1,25	
06	1 030	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 0,70 \text{ SiO}_2 \\ 0,30 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		$\frac{x}{10} (\text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3)$
07	1 010	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 3,65 \text{ SiO}_2 \\ 0,35 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		+ (1-x) $\begin{pmatrix} 0,3 \text{ K}_2\text{O} \\ 0,7 \text{ CaO} \end{pmatrix}$ +
08	990	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 3,60 \text{ SiO}_2 \\ 0,40 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		0,3 Al ² O ³ + 4 SiO ²
09	970	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 3,55 \text{ SiO}_2 \\ 0,45 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		0,2 Fe ² O ³ + 4 SiO ²
010	950	1	»	+ 1	»	+ $\begin{matrix} 3,5 \text{ SiO}_2 \\ 0,5 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$	5	
011	920	1	$\begin{pmatrix} 0,5 \text{ Na}_2\text{O} \\ 0,5 \text{ PbO} \end{pmatrix}$	+ 0,8	Al ² O ³	+ $\begin{matrix} 3,6 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$	0,62	
012	890	1	»	+ 0,75	»	+ $\begin{matrix} 3,5 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
013	860	1	»	+ 0,70	»	+ $\begin{matrix} 3,4 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
014	830	1	»	+ 0,65	»	+ $\begin{matrix} 3,3 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
015	800	1	»	+ 0,60	»	+ $\begin{matrix} 3,2 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$	0,57	$x(2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$
016	770	1	»	+ 0,55	»	+ $\begin{matrix} 3,1 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		+ (1-x) $\begin{pmatrix} 0,5 \text{ Na}_2\text{O} \\ 0,5 \text{ PbO} \end{pmatrix}$ +
017	740	1	»	+ 0,50	»	+ $\begin{matrix} 3,0 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		2 SiO ²
018	710	1	»	+ 0,40	»	+ $\begin{matrix} 2,8 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		1 B ² O ³
019	680	1	»	+ 0,30	»	+ $\begin{matrix} 2,6 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
020	650	1	»	+ 0,20	»	+ $\begin{matrix} 2,4 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
021	620	1	»	+ 0,10	»	+ $\begin{matrix} 2,2 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$		
022	590	1	»	+		+ $\begin{matrix} 2,0 \text{ SiO}_2 \\ 1,0 \text{ B}_2\text{O}_3 \end{matrix}$	0	

données ; on a porté les températures en ordonnées et en abscisses les valeurs des x du tableau ;

Ces montres fusibles de Seger sont d'un usage général en céramique ; elles sont d'un emploi très commode dans tous les fours intermittents dont la température doit monter constamment jusqu'à un certain maximum à

partir duquel on laisse le refroidissement se faire. Il suffit alors avant la mise en feu de placer un certain

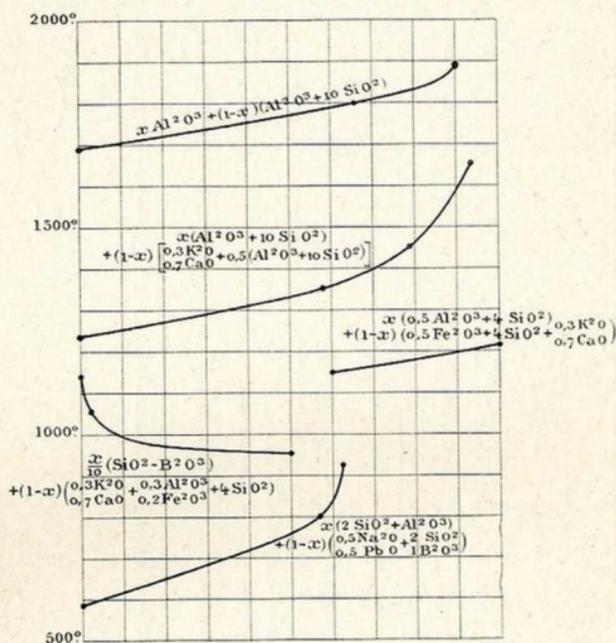


Fig. 38.

nombre de montres fusibles vis-à-vis d'un regard fermé par un verre à travers lequel on peut les suivre. En les voyant successivement tomber, on sait à quel moment le four passe par une série de températures déterminées.

Dans les fours continus on peut encore les introduire dans le four pendant la marche, mais cela est plus délicat. Il faut les placer sur de petits supports en terre cuite que l'on dépose avec une tringle de fer dans un endroit voulu du four. Quand au contraire on les installe par avance dans le four froid, on les colle à leur place avec une petite boulette d'argile.

CHAPITRE XI

PYROMÈTRES ENREGISTREURS

Parmi les différents procédés de mesure des températures élevées, quelques-uns se prêtent à l'enregistrement continu. Cet enregistrement est aussi utile pour les applications industrielles que pour les recherches scientifiques. Dans les laboratoires de recherches, on s'attache autant que possible à effectuer toutes les mesures par des procédés automatiques échappant à l'influence soit des idées préconçues, soit des négligences des observateurs ; dans les usines, l'emploi de procédés semblables donne un contrôle continu du travail des ouvriers que la présence d'aucun surveillant ne saurait remplacer.

L'enregistrement peut se faire au moyen d'une plume écrivante ou par la photographie. Le premier de ces procédés, d'un maniement plus simple, est préférable dans les usines ; le second, dont les indications sont plus précises, est préférable dans les laboratoires. Mais le plus souvent, on n'a pas le choix, chaque phénomène utilisé dans les mesures ne se prêtant généralement qu'à un seul procédé d'enregistrement. Actuellement, trois seulement parmi les différents pyromètres ont pu être rendus enregistreurs :

Le pyromètre à gaz à volume constant,

Le pyromètre thermo-électrique,

Le pyromètre à résistance électrique.

Mais pratiquement, jusqu'ici, le pyromètre thermo-électrique a seul fonctionné d'une façon continue comme enregistreur.

Pyromètre enregistreur à gaz. — La transformation du pyromètre à gaz en pyromètre enregistreur est extrêmement simple et a été faite depuis longtemps. Il suffit de réunir d'une façon invariable le tube du réservoir en porcelaine à un manomètre enregistreur pour réaliser un pyromètre enregistreur théoriquement parfait. Mais pratiquement, ces appareils présentent des inconvénients multiples qui ont empêché leur emploi de se répandre.

Au-dessus de $1\ 000^{\circ}$, la perméabilité de la porcelaine à la vapeur d'eau suffit pour les mettre très rapidement hors de service. Des expériences faites à la Compagnie Parisienne du gaz ont montré que dans les fours chauffés à $1\ 100^{\circ}$, la pénétration de la vapeur d'eau est assez rapide pour qu'au bout de quelques jours on puisse recueillir de l'eau liquide dans les parties froides de l'appareil.

L'étanchéité absolue de l'appareil, qui est tout à fait indispensable, puisque son fonctionnement suppose l'invariabilité de la masse gazeuse, est très difficile à obtenir. Fréquemment, la couverture de la porcelaine présente des piqûres. Les nombreuses soudures que comportent l'appareil enregistreur, et surtout les parties métalliques de l'appareil, peuvent donner lieu à des fuites de gaz très faibles et difficiles à reconnaître.

Le raccord des parties métalliques avec le tube de porcelaine se fait généralement avec de la cire, toujours avec des matières d'origine organique qui, au voisinage des appareils industriels généralement volumineux

et à parois épaisses, ne peuvent être protégées contre le rayonnement que par une enveloppe à circulation d'eau. C'est là une sujétion grave.

Dans les appareils de laboratoire de petites dimensions, la protection du joint est plus facile, mais alors les grandes dimensions du réservoir sont, comme on l'a déjà indiqué, un grave inconvénient. On ne peut, dans un petit four, trouver un grand volume dont la température soit uniforme.

Mais l'inconvénient le plus immédiat du pyromètre enregistreur à gaz, qui a dû être la cause principale de son abandon, est la difficulté de sa graduation. Déjà avec le manomètre à mercure, la présence de l'espace nuisible est une source de complications. On peut cependant la mesurer et en tenir compte. Avec le manomètre enregistreur, l'espace nuisible est beaucoup plus grand, et de plus, variable avec la déformation du tube élastique. La graduation ne pourrait donc être faite que d'une façon empirique, en employant des bains à point de fusion ou d'ébullition fixe, ce qui est presque toujours irréalisable avec un appareil en porcelaine très fragile.

Pyromètre enregistreur à résistance électrique. —

Après le pyromètre à gaz, le plus ancien en date, nous donnerons immédiatement le pyromètre à résistance électrique qui est le plus récent. Il n'a pas encore été employé et il n'y a, pour ce motif, que peu de choses à en dire.

Pour rendre son pyromètre enregistreur (fig. 39), M. Callendar emploie l'artifice suivant très simple. Deux des branches du pont de Wheatstone servant à mesurer la résistance de la spirale chauffée sont constituées par un fil unique sur lequel glisse un curseur auquel

aboutit un des fils du galvanomètre. A chaque position du curseur correspond, quand le galvanomètre est au zéro, une résistance, et par suite une température déterminée de la spirale.

La position du curseur peut être enregistrée facilement en y fixant une plume écrivant sur une feuille de papier qui se déplace perpendiculairement à la longueur du fil. Il suffira, pour que la courbe ainsi obtenue corresponde à celle des températures, que la position des curseurs soit à chaque instant réglée de façon à maintenir le galvanomètre au zéro.

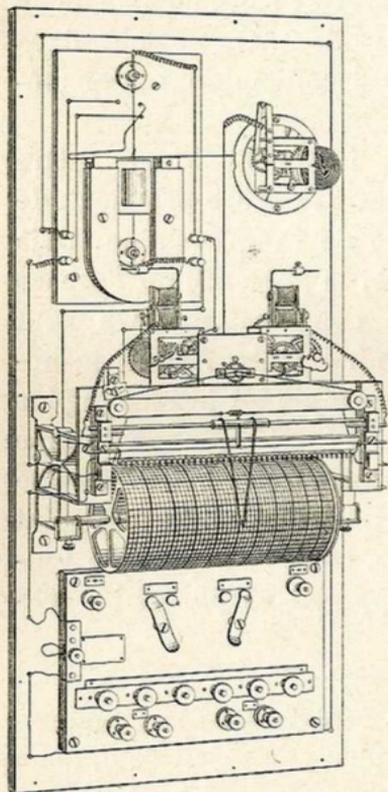


Fig. 39.

un galvanomètre à cadre mobile dont l'aiguille porte une fourche qui vient buter sur un contact donnant alors passage à un courant.

La figure 40 donne un exemple d'une courbe enregistrée avec cet appareil.

Cet appareil enregistreur compliqué est nécessairement très coûteux, mais il est actuellement le seul qui

Ce résultat est obtenu au moyen d'un mouvement d'horlogerie commandé par un relais que le galvanomètre actionne dans un sens ou dans un autre suivant le sens de la déviation qu'il tend à éprouver à partir du zéro. C'est

permette l'enregistrement des températures élevées par des procédés purement mécaniques, sans l'intervention

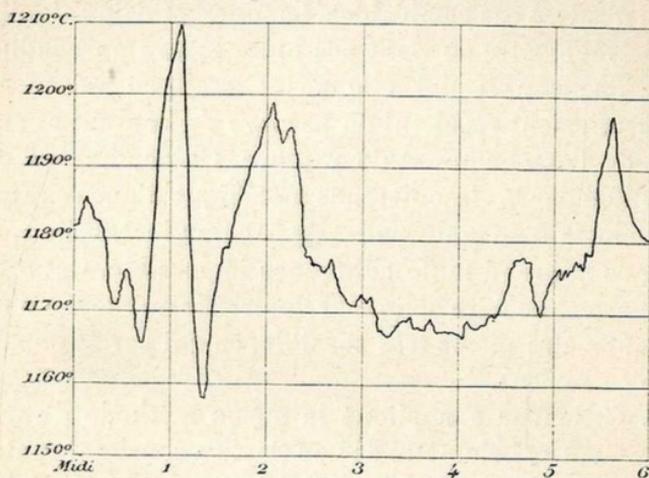


Fig. 40.

de la photographie ; il est possible que son emploi se répande dans certaines grandes usines. Pour les travaux

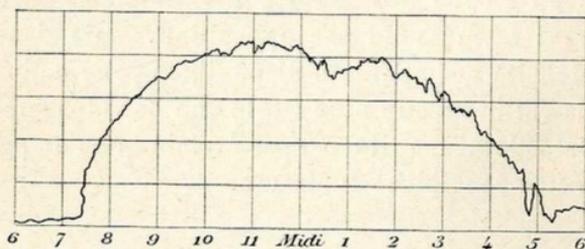


Fig. 41.

de laboratoire il semble moins convenable ; l'enregistrement enlève à la méthode des résistances électriques la grande précision qu'elle comporte et qui en fait le principal mérite ; elle lui laisse ses inconvénients : obligation d'employer pour la protection de la spirale un tube de porcelaine fragile et relativement volumineux.

Cet enregistreur présente un détail intéressant qui en assure le bon fonctionnement et pourrait être utilisé dans d'autres cas semblables. La fourchette de l'aiguille du galvanomètre ne vient pas buter contre un conducteur fixe sur lequel elle se collerait en raison de l'échauffement résultant du passage du courant et surtout de l'extra-courant de rupture. Ce conducteur est constitué par la circonférence métallique d'une roue qui est animée d'un mouvement de rotation lent, mais continu, ce qui rend toute adhérence impossible. Cet artifice permet de faire actionner des relais au moyen d'un galvanomètre même très sensible, ce qui serait impossible autrement.

M. Callendar a appliqué la même méthode d'enregistrement au bolomètre de Langley. La courbe ci-contre (fig. 41) donne l'enregistrement de la radiation solaire pendant une journée.

Théoriquement au moins la même méthode d'enregistrement peut s'appliquer à la mesure des températures au moyen des couples thermo-électriques en employant la méthode par opposition. Mais dans ce cas l'intensité des courants disponibles pour actionner le relais est beaucoup plus faible que dans les applications précédentes, et il n'est pas certain que l'on puisse obtenir une sensibilité suffisante.

Pyromètre enregistreur thermo-électrique. — Les seuls pyromètres enregistreurs employés couramment aujourd'hui sont les pyromètres thermo-électriques à enregistrement photographique. De nombreuses tentatives ont été faites pour obtenir un enregistrement avec une plume comme cela se fait pour les voltmètres et ampèremètres industriels enregistreurs, mais jusqu'ici on n'a pas encore réussi. Les intensités de courant



dont on dispose sont trop faibles ; en se contentant d'une précision de 10° , il faut un appareil sensible au $\frac{1}{10\,000}$ de volt ; la résistance des cadres du galvanomètre devant, pour les raisons exposées plus haut, être considérable, 100 ohms au moins, le courant correspondant ne sera que de un millionième d'ampère. On trouve bien dans le commerce de prétendus pyromètres enregistreurs semblables, mais ils sont construits avec des cadres de galvanomètre de quelques ohms seulement et ne peuvent pas donner de mesures de températures exactes à 100° près.

Dans l'enregistrement des températures, on peut chercher deux résultats tout à fait différents auxquels conviennent des procédés d'enregistrement également différents. On peut se proposer de déterminer la température à une époque déterminée, c'est-à-dire de tracer la courbe des températures en fonction du temps. Ce sera presque toujours le but poursuivi dans les usines. Il suffit, dans ce cas, de faire tomber le faisceau lumineux réfléchi par le miroir du galvanomètre sur une plaque sensible animée d'un mouvement de translation vertical. Les deux coordonnées de la courbe ainsi enregistrée donnent, l'une la température, l'autre le temps. On peut, au contraire, se proposer de connaître la vitesse de variation de la température à un moment donné, en même temps que la valeur correspondante de la température. C'est le cas dans la plupart des recherches de laboratoire dans lesquelles on cherche la température à laquelle se produit un phénomène déterminé : fusion, transformation allotropique, etc. ; et pour reconnaître la production de ce phénomène, on utilise le plus souvent l'absorption ou le dégagement corrélatif de chaleur latente qui se traduit par une variation dans la loi de l'échauffement ou du refroidissement.

C'est ce dernier mode d'enregistrement qui a été le premier réalisé par M. H. Lechatelier à l'occasion de ses études sur les argiles. Un faisceau lumineux réfléchi par le miroir du galvanomètre est envoyé périodiquement à des intervalles réguliers, de une seconde par exemple, sur une plaque sensible fixe. La distance de deux images successives donne la variation de température pendant l'unité de temps, c'est-à-dire la vitesse d'échauffement ou de refroidissement; la distance de la même image à l'image correspondant au début du chauffage donnera la mesure de la température.

Dans toutes les expériences d'enregistrement photographique, il faut remplacer les *miroirs* habituels des galvanomètres qui donnent des images tout à fait insuffisantes comme netteté et comme intensité par des miroirs spéciaux formés par une lentille plan convexe, argentée sur sa face plane. Ces miroirs sont un peu plus lourds que les miroirs à faces parallèles, mais ils ont deux avantages importants : l'absence d'images parasites réfléchies par la surface antérieure du miroir et une plus grande rigidité qui évite les flexions accidentelles du miroir par suite de la fixation sur son support. On obtient facilement de bons miroirs semblables de 20 millimètres de diamètre et plus difficilement de 30 millimètres de diamètre. Ces derniers donnent neuf fois plus de lumière que les miroirs habituellement employés. Il est facile de faire le choix de la lentille pour obtenir un miroir de distance focale déterminée. Une lentille plan convexe dont le foyer principal par transmission est de 1 mètre donnera, après argenture de la face plane, un système optique équivalant à un miroir à faces parallèles dont le rayon de courbure serait également de 1 mètre.

Enregistrement discontinu. — Dans ce mode d'enre-

gistrement la *source lumineuse* doit présenter des variations périodiques ; une des plus simples à employer est une étincelle d'induction jaillissant entre deux pointes métalliques. L'interruption du courant est produite par une pendule à des intervalles de temps déterminé.

Pour avoir une étincelle assez lumineuse il faut employer une bobine d'induction actionnée de façon à donner librement des étincelles de 50 millimètres et la renforcer au moyen d'une bouteille de Leyde qui réduise la longueur de ces étincelles à 5 millimètres ; il suffit pour cela d'une jarre de 1 à 2 litres. Le choix du métal constituant les pointes est également important ; le zinc, l'aluminium et surtout le magnésium donnent des étincelles très photogéniques. Ces métaux ont l'inconvénient de s'oxyder assez rapidement à l'air, ce qui oblige à retailler de temps en temps les pointes avec quelques coups de lime. Les baguettes de métal peuvent avoir 5 millimètres de diamètre, et la distance des pointes est de 2 millimètres. On pourrait sans doute avec le mercure, qui donne des étincelles aussi photogéniques que le magnésium, constituer un appareil clos où le métal se conserverait inaltéré.

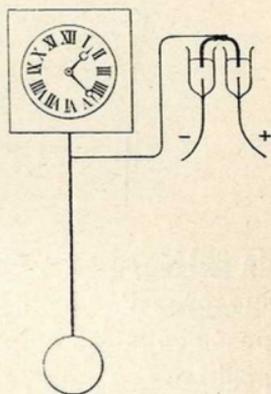


Fig. 42.

Pour provoquer l'interruption, on fixe au balancier (fig. 42) une fourchette verticale en platine qui vient plonger dans deux masses de mercure couvertes d'alcool. Il est utile, pour réduire au minimum la résistance que l'immersion de la fourchette oppose au mouvement de la pendule, de placer cette fourchette dans le même plan horizontal que l'axe de rotation du pendule. On évite

ainsi les mouvements de translation dans le mercure qui sont de beaucoup les plus nuisibles.

Le seul point délicat dans cet éclairage intermittent est d'obtenir, avec l'étincelle beaucoup trop large et trop irrégulière pour être photographiée directement, l'éclairage d'une fente très fine. On ne peut se contenter de placer l'étincelle derrière la fente et à une petite distance parce que le plus petit déplacement de l'étincelle ferait tomber le pinceau lumineux en dehors du miroir

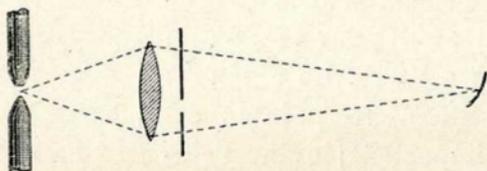


Fig. 43

du galvanomètre. On tourne facilement cette difficulté au moyen d'un artifice bien connu. Une lentille est interposée entre les pointes et le miroir (fig. 43) ; on règle la position des pointes de telle sorte que l'image du miroir vienne se projeter entre ces deux pointes. Avec une distance des pointes de 2 millimètres, une lentille de 100 millimètres de distance focale principale et un miroir de 25 millimètres de diamètre, l'image de ce dernier touchera les deux pointes ; l'étincelle traversera nécessairement alors l'image du miroir et les radiations transmises par la lentille tomberont certainement sur le miroir. On est donc assuré en plaçant devant la lentille une fente métallique fine que toutes les radiations transmises arriveront au miroir et seront renvoyées sur la plaque photographique, et cela quelle que soit la position de la fente devant la lentille.

Pour économiser le temps il est avantageux de faire sur une même plaque plusieurs expériences ; on y arrive

très simplement en disposant la plaque de façon à ce qu'elle puisse être déplacée verticalement entre deux expériences, ou en disposant la fente de façon à ce qu'elle puisse être semblablement déplacée devant la lentille.

Le tableau ci-dessous (fig. 44) est la reproduction de

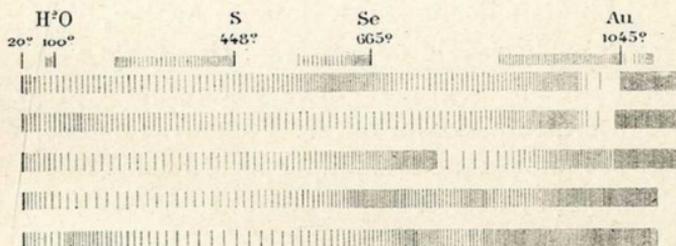


Fig. 44.

clichés relatifs à l'action de la chaleur sur les argiles. La première ligne donne la graduation du couple, elle a été dessinée d'après plusieurs photographies différentes qui ont été groupées pour économiser la place. Les lignes suivantes, 1, 2, 3, 4, 5 sont des reproductions de clichés faits en phototypographie sans aucune intervention de la main du dessinateur. La ligne 1 par exemple, représente l'échauffement d'une argile ordinaire. Un léger resserrement des traits entre 150 et 350° indique un premier phénomène avec absorption de chaleur, c'est la vaporisation de l'eau hygrométrique. Un second ralentissement beaucoup plus important entre 550° et 650° indique la déshydratation proprement dite de l'argile, le départ des deux molécules d'eau combinées. Enfin, l'espacement considérable des traits à 1000° indique un dégagement brusque de chaleur corrélatif du changement d'état isomérique après lequel l'alumine est devenue insoluble dans les acides. Les autres lignes

se rapportent à l'échauffement d'autres variétés d'argile, la ligne 3 au kaolin, la ligne 5 à la stéargilite.

Enregistrement continu. — L'enregistrement continu des températures est d'un usage beaucoup plus général, même dans les laboratoires scientifiques, en raison sans doute de la simplicité plus grande de son installation. Il a été étudié surtout par M. Roberts Austen, directeur de la Monnaie royale de Londres. Une fente verticale éclairée par une source lumineuse convenable projetée, par l'intermédiaire du miroir du galvanomètre, son image sur une plaque métallique percée d'une fine fente horizontale, et derrière cette fente se déplace une surface sensible, plaque ou papier, qui reçoit le pinceau lumineux, déterminé par l'intersection de la fente horizontale avec l'image de la fente verticale. Si tout était en repos l'impression produite par ce pinceau lumineux se réduirait à un point. Si la plaque se déplace seule, on aura une ligne droite verticale; si le galvanomètre se déplace seul, une ligne horizontale. Enfin le déplacement simultané de la plaque et du miroir du galvanomètre donne une courbe dont les abscisses horizontales représentent les températures, et les ordonnées verticales les temps.

L'éclairage de la fente, le mouvement de la surface sensible peuvent être réalisés de bien des façons différentes.

Eclairage de la fente. — Il y a deux cas bien distincts à considérer, celui des expériences de laboratoire par échauffement ou refroidissement rapide qui ne durent que quelques minutes, et celui de l'enregistrement continu des températures dans un foyer industriel qui pourra durer des heures et des jours, c'est-à-dire

des temps 100 fois et 1000 fois plus considérables. La vitesse de déplacement de la surface sensible, et par suite la durée d'exposition à l'action lumineuse, pourra varier dans le même rapport. La source lumineuse nécessaire sera donc tout à fait différente suivant les cas. Pour les déplacements très lents, on pourra se contenter d'une petite lampe veilleuse à pétrole ou à essence ayant une flamme de 5 à 10 millimètres de hauteur, ou même d'une simple flamme de gaz. Pour des déplacements plus rapides, on emploiera une lampe à pétrole ordinaire à verre, un bec Auer, ou une lampe à incandescence ; enfin pour les déplacements très rapides de la plaque sensible, 10 millimètres à 100 millimètres par minute, on peut avantageusement recourir à la lumière oxhydrique ou à l'arc électrique. Comme lumière oxhydrique, la plus commode est la lampe du D^r Roux à sphères de magnésie ; elle consomme peu de gaz et est enfermée dans une boîte métallique qui empêche toutes les diffusions gênantes de lumières.

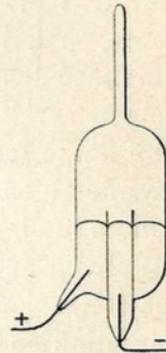


Fig. 45.

L'arc électrique donne beaucoup plus de lumière que l'on n'en a besoin et l'usure rapide du charbon en déplaçant les positions du point lumineux rend difficile la permanence de l'éclairage convenable de la fente. Pour des expériences très courtes, on peut très commodément employer la lampe à mercure dans le vide (fig. 45) où l'arc jaillit entre deux surfaces de mercure. Pour l'entretenir il faut 30 volts et 3 ampères. Son seul inconvénient est de s'éteindre après quelques minutes de fonctionnement par suite de l'évaporation du mercure dans le tube central. Il suffit, il est vrai, d'une simple secousse

pour la remettre en marche en faisant repasser une petite quantité de mercure de l'espace annulaire antérieur dans le tube central.

Quelle que soit la source lumineuse employée, on peut éclairer la fente au moyen d'une lentille disposée comme il a été indiqué à propos de l'enregistrement discontinu, c'est-à-dire projetant sur le miroir du galvanomètre l'image de la source lumineuse. Quand celle-ci est assez large, on pourrait se contenter de placer la fente devant la source lumineuse en la rapprochant suffisamment pour être certain que quelques-uns des rayons lumineux la traversant tombent bien sur le miroir. Mais on s'expose ainsi à beaucoup chauffer la fente, ce qui peut l'altérer; on est conduit en outre à employer des sources lumineuses plus volumineuses que cela ne serait nécessaire autrement. Dans le cas de l'emploi d'une lentille, l'intensité lumineuse utile est aussi grande qu'en plaçant la fente immédiatement contre la source lumineuse toutes les fois que l'image de celle-ci est plus grande que le miroir du galvanomètre; or avec les dimensions habituelles des sources employées, cette condition se trouve toujours remplie sans aucune précaution spéciale.

Au lieu d'une fente éclairée par une source distincte, on peut employer un fil de platine ou mieux, comme le fait M. Charpy, un filament de charbon de lampe à incandescence chauffé par le courant électrique.

Pour que le trait de la courbe enregistrée soit très fin, il est nécessaire que les deux fentes, la fente lumineuse et la fente horizontale, soient également très fines. Des ouvriers habiles peuvent tailler dans le métal des fentes semblables. Mais on peut les constituer beaucoup plus simplement en prenant une plaque photographique au gélatino-bromure que l'on expose à la lumière, déve-

loppe jusqu'à noircissement complet, puis lave et sèche. En coupant la gélatine avec la pointe d'un canif guidé par une règle, on obtient des fentes transparentes d'une finesse et d'une netteté parfaite.

Surface sensible. — On emploie comme surface sensible des plaques ou des papiers au gélatino-bromure. Le professeur Roberts Austen emploie exclusivement les plaques qui permettent plus facilement le tirage d'un grand nombre d'épreuves positives. M. Charpy, dans ses recherches sur la trempe de l'acier, s'est servi de papier sensible, ce qui permet d'avoir des installations beaucoup plus simples.

Papier. — Pour l'enregistrement industriel, le papier

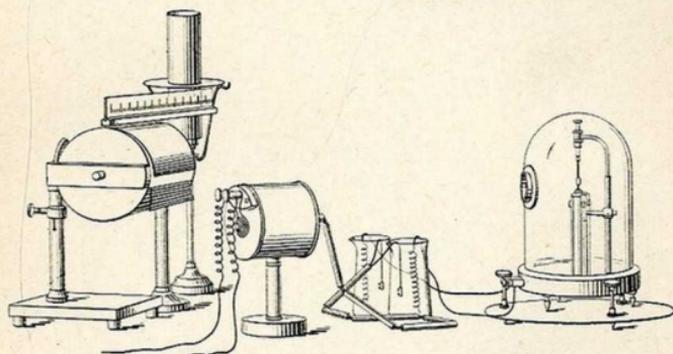


Fig. 46.

permettrait d'employer de grands rouleaux pouvant durer plusieurs jours, comme dans les appareils magnétiques enregistreurs de M. Mascart. Mais en général on a besoin d'obtenir rapidement les résultats de l'enregistrement; c'est toujours le cas dans les expériences de laboratoires, et presque toujours aussi dans les études industrielles. Il est donc préférable de se contenter de

bandes de papier assez courtes enroulées sur un cylindre. Il existe un modèle semblable très répandu et dont l'emploi est très pratique : les cylindres enregistreurs de la maison Richard avec mouvement d'horlogerie intérieur. On peut les commander au constructeur avec la vitesse de rotation que l'on désire ; malheureusement cette vitesse ne peut être changée au gré de l'opérateur, ce qui serait souvent utile pour les expériences de laboratoire.

La figure 46 représente l'installation du pyromètre enregistreur employé par M. Charpy dans ses expériences sur la trempe de l'acier. A droite le galvanomètre, à gauche le cylindre enregistreur Richard, au milieu le four électrique servant au chauffage des échantillons d'acier.

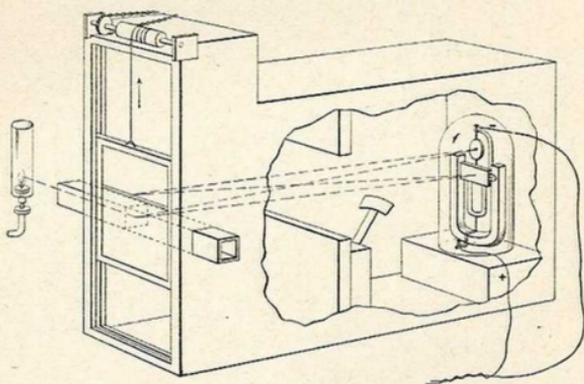


Fig. 47.

Plaques. — La plaque peut être fixée dans un châssis mobile entraîné par un mouvement d'horlogerie, c'est la première disposition (fig. 47) employée par le professeur Roberts Austen. Mais cette installation un peu coûteuse et compliquée a le même inconvénient que les cylindres enregistreurs de ne pouvoir donner qu'une seule vitesse de déplacement à la surface sensible.

M. Roberts Austen emploie maintenant pour déplacer la plaque un système à flotteur dans lequel la vitesse d'élévation du niveau de l'eau est réglée à volonté par l'emploi d'un vase de Mariotte et d'un simple robinet. La plaque est maintenue dans un plan vertical invariable au moyen de deux guides latéraux dont le frottement est négligeable en raison de la mobilité du flotteur. Le croquis ci-contre (fig. 48) donne la disposition d'un appareil semblable qui a été construit par M. Pellin pour le laboratoire du Collège de France. Il porte une plaque 13×18 qui est fixée sur le flotteur au moyen de deux ressorts latéraux non indiqués sur le croquis. Les deux guides du flotteur, noyés

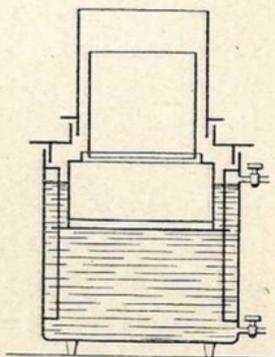


Fig. 48.

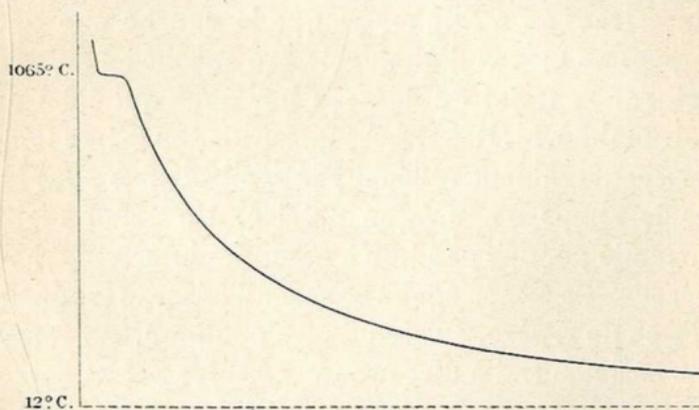


Fig. 49.

sous l'eau, ne sont pas non plus indiqués : le jeu dans le guidage est seulement de 2 dixièmes de millimètre. L'incertitude que ce jeu peut occasionner dans la position de la plaque est tout à fait négligeable.

La courbe ci-dessus (fig. 49) est la reproduction d'une

expérience faite avec un dispositif semblable par M. Roberts Austen sur la solidification de l'or.

Pendant toute la durée de la solidification, la température est restée stationnaire, puis l'abaissement de la température s'est produit avec une vitesse régulièrement décroissante au fur et à mesure que la température du métal se rapprochait de la température ambiante.

Il est indispensable de tracer sur chaque surface sensible où l'on a enregistré une courbe la ligne de température ambiante, ou tout au moins une ligne de repère parallèle. Cela est très facile dans le cas de la plaque guidée ou du papier enroulé sur un cylindre. Il suffit, après avoir ramené le couple à la température ambiante, de déplacer en sens inverse la surface sensible, la seconde courbe tracée pendant ce mouvement inverse est précisément la ligne du zéro de la graduation des températures. Mais c'est là une sujétion que l'on peut éviter en inscrivant en même temps que la courbe une ligne de repère au moyen d'un miroir fixe attaché au galvanomètre sur le trajet du faisceau lumineux qui éclaire le miroir mobile. M. Roberts Austen utilise en même temps le faisceau lumineux réfléchi par le miroir fixe pour inscrire le temps d'une façon précise. Un écran mobile commandé par une pendule à secondes interrompt à des intervalles de temps égaux ce second faisceau lumineux. La ligne de repère, au lieu d'être continue, est formée d'une série de traits discontinus dont les points correspondants sont espacés d'une seconde comme on le voit sur la figure 49.

Les courbes une fois obtenues doivent être examinées de très près pour reconnaître les points où l'inclinaison présente des anomalies passagères, caractéristiques des transformations du corps étudié. Le plus souvent, ces irrégularités se réduisent à très peu de chose,

et il y aurait intérêt, pour les reconnaître avec certitude, d'obtenir des courbes tracées à beaucoup plus grande échelle. Pratiquement, cette amplification n'est pas possible ; on peut bien augmenter la sensibilité du galvanomètre, et par suite ses déviations, mais alors l'image lumineuse pour la plupart des températures tombera en dehors de la plaque sensible. Le professeur Roberts Austen a tourné cette difficulté d'une façon très ingénieuse. Il n'enregistre plus la température du corps, mais la différence entre cette température et celle d'un corps voisin ne présentant pas de transformation, le platine, par exemple. Cet écart de température, toujours

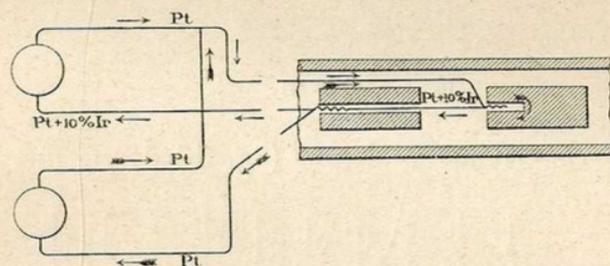


Fig. 50.

faible, peut être enregistré avec un galvanomètre très sensible. Si à un moment donné, le corps, autre que le platine, éprouve un changement d'état accompagné de phénomènes calorifiques même très faibles, la différence des deux températures pourra, en raison de sa faible valeur, éprouver des variations relativement très grandes. Si l'on se propose, non seulement de reconnaître l'existence d'un phénomène, mais encore de mesurer la température à laquelle il se produit, il faudra employer simultanément un couple relié à un autre galvanomètre. On peut, avec trois fils, deux de platine et un de platine rhodié, constituer un couple complexe donnant à la fois les températures réelles et les diffé-

rences de température de deux corps voisins. Le cro-

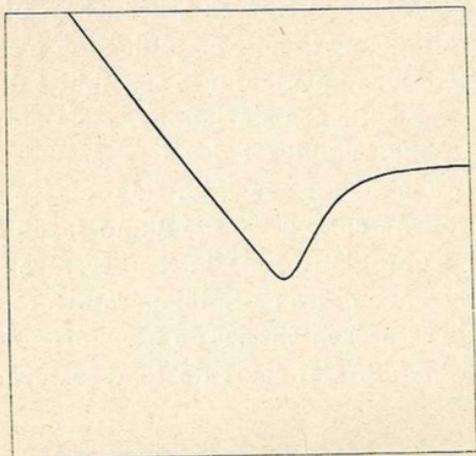


Fig. 51.

quis schématique ci-dessus (fig. 50) donne une idée

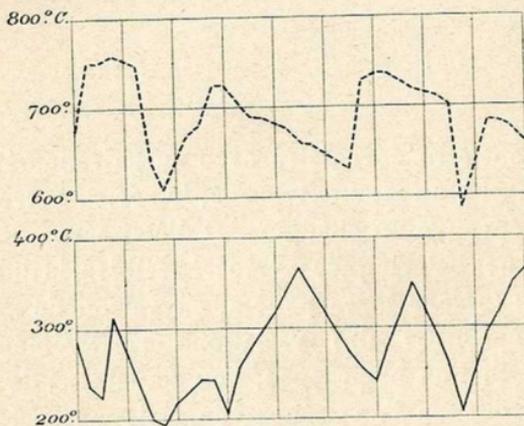


Fig. 52.

de cette disposition qui a rendu de grands services à M. Roberts Austen dans l'étude des alliages et, en particulier, dans l'étude des transformations des fers et aciers.

On reproduit ci-contre une courbe de solidification de l'étain (fig. 51) obtenue par cette méthode. Le double crochet indique l'existence d'une surfusion très nette; l'étain, avant de se solidifier, descend de 2° au-dessous de son point de fusion auquel il revient brusquement aussitôt la solidification commencée.

Les pyromètres enregistreurs ont plutôt été employés jusqu'ici dans les laboratoires scientifiques. Il en existe cependant quelques-uns dans des usines métallurgiques, notamment aux hauts fourneaux de Clarence Works appartenant à sir Lothian Bell et aux hauts fourneaux de Dowlais. Les courbes de la figure 52 donnent un exemple de courbes relevées à Clarence Works; la courbe inférieure donne la température des gaz au gueulard, et la courbe supérieure, celle du vent chaud.

CONCLUSION

En terminant cet exposé il ne sera pas inutile d'appeler l'attention des expérimentateurs sur les points dont l'étude paraît la plus urgente pour faire progresser notre connaissance des températures élevées.

Nous mentionnerons d'abord la détermination précise des points fixes servant à la graduation des pyromètres ; il n'existe actuellement au-dessus du point d'ébullition du soufre aucune température connue d'une façon certaine à 1° près. Pour l'ébullition du zinc, la fusion de l'argent et celle de l'or qui sont actuellement les mieux connues, l'incertitude peut être de 10°. Il faudrait également tâcher de trouver pour servir de points fixes des corps d'un emploi plus commode que les métaux, des sels, par exemple, qui n'attaquent le platine ni à l'état fondu, ni à l'état de vapeur ; ces corps devraient être obtenus facilement et économiquement à l'état de pureté ; ils devraient posséder des points de fusion et d'ébullition bien déterminés, ce qui n'est pas toujours le cas quand le sel cristallisé présente plusieurs variétés dimorphes.

Un second point très important en vue des recherches de haute précision serait de déterminer la forme générale de la fonction qui relie la résistance électrique du platine à la température. On ne peut pas se proposer de déterminer complètement cette fonction avec la valeur de ses paramètres parce qu'il n'y a pas deux échantil-

lons de platine possédant la même résistance ; il faut dans chaque cas faire la graduation au moyen de points fixes de fusion ou d'ébullition. Le nombre de points semblables à repérer dépend du nombre de paramètres contenus dans la formule. Dans cet ordre d'idées, M. Silas Holman a grandement facilité l'emploi des couples thermo-électriques en montrant que l'on pouvait entre 0 et 1800° se contenter d'une formule logarithmique ne contenant que deux paramètres.

Pour la mesure des températures extrêmement élevées qui ne peuvent être atteintes que par les méthodes employant la radiation, et en se livrant à des extrapolations souvent considérables, il serait très utile de déterminer avec plus de précision qu'on ne l'a fait jusqu'ici les lois de la radiation d'un corps rigoureusement noir (enceinte fermée), soit pour une radiation monochromatique, radiation transmise par les verres rouges, soit pour la totalité des radiations calorifiques. Mais une semblable étude ne peut avoir d'intérêt qu'à la condition de présenter une précision très grande, difficile à atteindre actuellement en raison de l'incertitude qui règne encore sur les températures directement mesurables. Pour une précision moyenne, on peut se contenter des formules de Stefan et de M. Le Chatelier, certainement très voisines de la réalité, puisqu'elles s'accordent encore sensiblement jusqu'à la température du soleil voisine de 8 000°. Il y aurait seulement à vérifier et à préciser davantage les valeurs des paramètres qui entrent dans ces deux formules.

Qu'il nous soit permis en terminant d'insister sur un fait qui a son importance. La mesure des températures élevées présente certainement un grand intérêt au point

de vue des progrès de la science pure ; ce problème n'est cependant arrivé à des solutions satisfaisantes que sous l'influence de préoccupations industrielles. Wedgwood, fabricant de faïence, cherchait à améliorer sa fabrication ; de même Seger, à la manufacture de Berlin, s'occupait exclusivement des produits céramiques, Siemens cherchait à régulariser la fabrication de l'acier fondu sur sole, les ingénieurs de la Compagnie Parisienne avaient en vue un moyen de contrôle de la distillation de la houille, M. H. Le Chatelier a étudié le pyromètre thermo-électrique au cours de recherches sur la cuisson de la chaux et sur la fabrication des ciments ; il a étudié le pyromètre optique à la demande d'un fabricant d'acier de Sheffield, M. Hadfield, qui désirait pour son industrie un pyromètre réunissant la précision à la simplicité d'emploi. M. Roberts Austen, directeur de la monnaie de Londres, consacre tous ses efforts depuis bien des années à l'étude des alliages industriels pour laquelle il a su tirer un parti si utile du pyromètre enregistreur.

Cette répercussion des préoccupations pratiques sur les progrès de la science n'a rien qui doive surprendre. Les savants qui ont fondé la chimie ne connaissaient pas la distinction entre la science théorique et la science pratique. Lavoisier, Chevreul, Gay-Lussac, Dumas, Thénard, H. Sainte-Claire-Deville allaient indifféremment du laboratoire à l'usine. C'est l'orientation actuelle de notre enseignement qui a creusé un fossé tous les jours plus profond entre la théorie et la pratique.

Dans les laboratoires scientifiques tous les efforts convergent vers les sentiers depuis longtemps frayés. On y est maître de choisir ses sujets d'études au gré de ses caprices, on peut se laisser guider par des préoccupations artificielles ne se rattachant que bien indirectement à l'étude de la nature. Enfin on pourra longtemps

accorder sa confiance à des résultats erronés sans que rien vous oblige à reconnaître l'erreur commise. Dans les usines, il en est tout autrement; on ne peut pas s'immobiliser sur les problèmes déjà résolus, on est malgré soi obligé à marcher de l'avant. Les sujets d'étude s'imposent et doivent nécessairement être abordés dans l'ordre de leur importance réelle. Les conclusions erronées sont mises en évidence par leurs contradictions de tous les instants avec des faits que l'on ne peut se refuser à voir. Ces conditions expliquent comment les laboratoires d'usines avec leur personnel insuffisant et absorbé par d'autres préoccupations, avec leur matériel rudimentaire, arrivent cependant à contribuer largement aux progrès de la science pure. Tous les progrès si importants de la chimie du fer se font aujourd'hui dans les usines et dans les laboratoires qui sont en rapport avec elles.

Il n'y a pas qu'en chimie d'ailleurs que les préoccupations pratiques aient manifesté cette puissance créatrice. C'est en étudiant le forage des canons que Rumford a rencontré la notion de conservation de l'énergie, c'est en réfléchissant au fonctionnement des machines à feu que Sadi Carnot a jeté les bases de toute la thermo-dynamique, c'est en cherchant à perfectionner les lentilles de phares que Fresnel a porté ses investigations sur la théorie de la lumière.



INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

ÉCHELLE NORMALE DES TEMPÉRATURES.

- Carnot.* — Réflexions sur la puissance motrice du feu.
- Lippmann.* — Traité de thermodynamique, p. 51.
- Thompson et Joule.* — Philosophical Transaction of the Royal Society, t. CLII, 1862, p. 579.
- Lehrfeldt.* — Philosophical Magazine, t. XLV, p. 363 (1898).
- Callendar.* — Phil. trans. of R. S., t. CLXXVIII, (1888), p. 161-220.
- Regnault.* — Relation sur des expériences... (1847), t. I, p. 168.
- Chappuis.* — Études sur le thermomètre à gaz (Trav. du bureau international des poids et mesures (1888), t. VI).

PYROMÈTRES A GAZ.

- Pouillet.* — Traité de physique, 9^e édition (1858), t. I, p. 233. — C. R., t. III (1836), p. 782.
- Ed. Becquerel.* — C. R., t. LVII, (1863), p. 855, 902 et 955.
- Sainte-Claire Deville et Troost.* — C. R., t. XC (1889), p. 727 et 773.
- Violle.* — Chaleur spécifique du platine. C. R., t. LXXXV (1877), p. 543. — Chaleur spécifique du palladium. C. R., t. LXXXVII (1873), p. 98. — Point d'ébullition du zinc. C. R., t. XCIV (1882), p. 721.
- C. Barus.* — Mesure des températures élevées. Bulletin du service géologique des États-Unis (1889), n° 54.
- Holborn et Wien.* — Bulletin de la Société d'encouragement, 5^e série, t. I (1896), p. 1012.
- Crafts et Meier.* — Densité de la vapeur d'iode. C. R., t. XC (1880), p. 690.
- Randall.* — Perméabilité du platine. Bull. Soc. Chim., t. XXI (1898), p. 682-692.
- Mallard et Le Chatelier.* — Ann. des Mines, t. IV (1884), p. 276.

Daniel Berthelot. — Sur une nouvelle méthode pour la mesure des températures. C. R., t. CXX (1895), p. 831.

PYROMÈTRE CALORIMÉTRIQUE.

Violle. — Points de fusion et d'ébullition C. R., t. LXXXIX (1879), p. 702.

Le Chatelier. — Seizième congrès de la Société technique de l'industrie du gaz (juin 1889).

Euchène. — Des relations thermiques dans la distillation de la houille (autographie).

Berthelot. — Calorimètre. Ann. Chim. et Phys., 4^e série, t. XX, p. 109; 5^e série, t. V, p. 5; 5^e série, t. X, p. 433 et 447; 5^e série, t. XII, p. 550.

PYROMÈTRE A RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE.

W. Siemens. — Proc. royal Soc., t. XIX (1871), p. 351. — Bakerian lecture (1871). — Transaction of Society of Telegraph engineers (1879). — British association (1874), p. 242.

Callendar. — Phil. Trans. of R. S., t. CLXXVIII (1888), p. 160-230. — Phil. Trans., 1892, p. 119. — Les pyromètres en platine. Iron and Steel Institute, mai 1892. — Phil. Magazine, t. XXXII, p. 104 (1891), t. XXXIII, p. 220 (1892).

Heycock et Neville. — Détermination of high temperatures. J. of chem. Society, t. LXVIII (1895), p. 160 et 1024.

Holborn et Wien. — Annalen der Phys. und Chem., t. XLVII (1892), p. 107; t. LVI (1895), p. 360. — Bulletin de la Société d'encouragement, 5^e série, t. I (1896), p. 1012.

PYROMÈTRE THERMO-ÉLECTRIQUE.

Becquerel. — Ann. Chim. et Phys., 2^e série, t. XXXI, p. 371 (1826).

Pouillet. — Traité de physique, 4^e éd., t. II, p. 684. — Comptes rendus, t. III, p. 786.

Ed. Becquerel. — Annales du Conservatoire, t. IV (1864), p. 597. — Comptes rendus, t. LV (1862), p. 826. — Annales de chimie et physique, 3^e série, t. LXVIII (1863), p. 49.

Regnault. — Relation des expériences sur les machines à feu, t. I, p. 240. — Comptes rendus, t. XXI (1847), p. 240.

Le Chatelier. — Pyromètre thermo-électrique. C. R., t. CII (1886), p. 819. — Journal de physique, 2^e série, t. VI, janvier 1887. — Génie civil, 5 mars 1887. — 16^e congrès de la Société technique de l'industrie du gaz, juin 1889. — Bulletin de la Société d'encouragement (1892).

C. Barus. — Washington, 1889. — Bull. du serv. géol. des États-Unis, n^o 54.

- Holborn and Wien.* — Annalen der phys. und chem., t. XLVII (1892), p. 107; t. LVI (1895), p. 360. — Zeit. des Vereines deutscher ingenieurs, t. XLI (1896), p. 226-227. — Stahl und Eisen, t. XVI, p. 840.
- Roberts Austen.* — Les progrès récents de la pyrométrie. — Transactions of the american Institute of mining engineers (1893).
- Quincke.* — Isolants céramiques pour les très hautes températures, Zeits. der Vereines deutscher ingenieurs, t. XL, p. 101-102.
- Struthers.* — Pyromètre thermo-électrique de M. H. Le Chatelier School of mines Quarterly, New-York, t. XII.
- E. Damour.* — Bulletin de l'Association amicale des anciens élèves de l'École des mines (mars 1889).
- H. Howe.* — Données pyrométriques. — Engineering and mining Journal, t. L (1890), p. 426.

PYROMÈTRE A RADIATION CALORIFIQUE.

- Violle.* — Radiation solaire Ann. Chim. et Phys., 5^e série, t. XX (1877), p. 289. — Journal de physique (1876), p. 277.
- Rosetti.* — Ann. Chim. et Phys., t. XVII (1879), p. 177. — Phil. mag., t. VIII (1879), p. 324.
- M. Deprez et d'Arsonval.* — Société de physique, 5 février 1886.
- Du Boys.* — Radiomicromètre (Phil. trans. of R. S., t. CLXXX (1887), p. 159.
- Wilson et Gray.* — Température du soleil. Phil. trans. of R. S., t. CLXXXV (1894), p. 361.
- Langley.* — Bolomètre. American Journal of Science, t. XXI (1881), p. 187; t. XXXI (1886), p. 1; t. XXXII (1886), p. 90; Journal de physique, t. IX, p. 59.

PYROMÈTRE A RADIATION LUMINEUSE.

- Kirchhoff.* — Ann. Chim. et Phys., t. LIX (1860), p. 124.
- Ed. Becquerel.* — Mesure optique des températures. — C. R., t. LV (1863), p. 826. — Ann. Chim. et Phys., t. LXVIII (1863), p. 49.
- Violle.* — Radiation du platine. C. R., t. LXXXVIII (1879), p. 171; t. XCI (1881), p. 866 et 1204.
- Crova.* — C. R., t. LXXXVII, 322 et 329; t. XC, 252; t. XCII, 36 et 707; t. CXIV, 941.
- Le Chatelier.* — Pyromètre optique. C. R., t. CXIV (1892), p. 214. — J. de physique, 3^e série, t. I (1892). — Industrie électrique, avril 1892. — Sur la température du soleil. C. R., t. CXIV (1892), p. 737. — Sur les températures des foyers industriels. C. R., t. CXIV (1892), p. 470.
- Stefan.* — Wien. Ber., t. LXXIX (1879), p. 391.

PYROMÈTRE PAR RETRAIT.

Wedgwood. — Phil. trans. of royal Soc., t. LXXII (1782), p. 305 ;
t. LXXIV (1784), p. 358.

Guyton de Morveau. — Ann. Chim. et Phys., 1^{re} série, t. XLVI
(1803), p. 276 ; t. LXXIII (1810), p. 254 ; t. LXXIV (1810), p. 18
et 129 ; t. XC (1814), p. 113 et 225.

PYROMÈTRE PAR FUSIBILITÉ.

Lauth et Vogt. — Mesures pyrométriques. Bull. soc. chim.,
t. XLVI (1886), p. 786.

Seeger. — Thorindustrie Zeitung (1885), p. 121 et (1886), p. 135 et
229.

PYROMÈTRES ENREGISTREURS.

Le Chatelier. — Étude sur les argiles. C. R., t. CIV (1887),
p. 1443.

Roberts Austen. — First report of the alloys research committee.
Proc. of Inst. of Mechanical engineers (1891), p. 543. — Journ.
of soc. of chem. industry, t. XVI (1896), p. 1 à 9. — Proc. of
Inst. of Mechanical engineers (1897).

G. Charpy. — Étude sur la trempe de l'acier. Bull. de la Soc.
d'encouragement, 4^e série, t. X (1895), p. 666.

Callendar. — Pyromètre enregistreur au platine. — Engineering,
26 mai 1899, p. 675.



E. DE CÉSARIS & O. BOUDOLANI

CAUTHER VILLARS