

Sté A^{me} de Commentry-Fourchambault et Decazeville

Usines à IMPHY, MONTLUÇON, MAZIÈRES, DECAZEVILLE, PAMIER, TARASCON-SUR-AR
Houillères à BRASSAC, DECAZEVILLE — Mines de fer à PUYMORENS

CAPITAL SOCIAL : 66.000.000 FRANCS



SIÈGE SOCIAL :

84, Rue de Lille — PARIS (7^e)

Tél. : LITTRÉ 81-04 et 81-05

Tél. : INTER : LITTRÉ 28

ACIÉRIES D'IMPHY

Reg. du Comm. NEVERS 152 B1

(Nièvre)

Téléphone : NEVERS 0-31

..... une des petites forges qui est à IMPHY dans
le Nivernois. Gens sur l'exactitude de qui je puis
me fier....."

Monsieur de RÉAUMUR.

L'ART D'ADOUCCIR LE FER FONDU (1722)

PYROMÈTRES INDUSTRIELS
A DILATATION
SYSTÈME P. CHEVENARD

1934



PYROMÈTRES INDUSTRIELS A DILATATION

— Système P. CHEVENARD —



SOMMAIRE

	Pages
Historique.	3
Description des divers types de pyromètres à dilatation.	4
Pyromètre à cadran (type A).....	4
Pyromètre à cadran, avertisseur, régulateur de température (type B) ..	5
Pyromètre à enregistrement chronographique, avertisseur, régulateur de température (type C).....	7
Pyromètre à enregistrement chronographique (type E).....	7
Pyromètre à enregistrement chronographique, avertisseur, régulateur de température, reproducteur de cycles thermiques (type F).....	7
Pyromètre double enregistreur (type D).....	9
Mode d'utilisation des pyromètres à dilatation	10
Relais	12
Quelques exemples d'applications des pyromètres à dilatation	13
Conclusions	16



HISTORIQUE (1)



Utilisé, il y a plus d'un siècle, par Alexandre Brongniart, pour le contrôle des fours à porcelaine, le pyromètre à dilatation de solides était, jusqu'à ces dernières années, à peu près abandonné.

Les cours de physique, les traités de pyrométrie lui déniaient toute précision. Ils ne lui consacraient quelques lignes dédaigneuses que pour lui reprocher son zéro instable, ses indications irréversibles et variables dans le temps, sa destruction rapide à haute température.

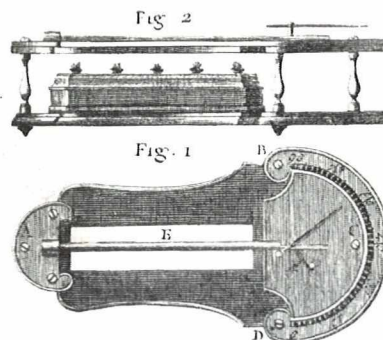
De tels jugements ne sont heureusement pas sans appel. Le pyromètre thermoélectrique, condamné sans réserve par Regnault, est devenu, entre les mains de M. Le Châtelier, un instrument de précision : les couples au platine sont, en effet, réversibles et stables, à rebours des couples fer-palladium étudiés par Regnault.

De même, si nombre de solides ont une dilatation irréversible et à multiples anomalies, si la plupart se déforment par viscosité à haute température, quelques-uns sont assez régulièrement dilatables et assez rigides à chaud pour convenir à la pyrométrie.

Ainsi corrigé de ses principaux défauts, le « thermomètre mécanique » apparaît un instrument très pratique. Il est simple, robuste, bon marché ; il est aussi totalement à l'abri des nombreuses causes d'erreur,

qui imposent tant de précautions minutieuses dans l'emploi industriel des couples thermoélectriques : altération du platine au contact du fer ou dans une atmosphère réductrice, affaiblissement des aimants du galvanomètre, modifications accidentelles de la résistance du circuit, courants de fuite et forces thermoélectriques parasites, etc...

Dès 1916, les études entreprises aux Acières d'Imphy avaient montré la remarquable fidélité d'un dispositif thermométrique, associant le **baros** à la silice fondue. De longs efforts ont été consacrés à le perfectionner et à l'utiliser pour des buts scientifiques et industriels. Le baros, alliage nickel-chrome à 10 pour cent de chrome, a été remplacé par le **pyros**, alliage nickel-chrome-tungstène, additionné de fer et de manganèse, plus rigide et à dilatation plus régulière (2). Puis, ont été créés une série d'appareils de laboratoire, destinés à l'étude et à l'enregistrement des propriétés thermiques des alliages : dilatomètres différentiels, galvanopyromètre, thermomagnétomètre, régulateurs de température (3). Le problème du pyromètre industriel, le plus simple en apparence, mais qui nécessite des qualités particulières de robustesse, de maniabilité et de sûreté a été résolu le dernier. C'est à lui que cette notice est consacrée.



Gravure extraite du cours de physique de l'abbé Nollet (1749) et représentant un pyromètre à dilatation.

(1) D'après P. Chevenard : « Pyromètres industriels à dilatation » (Revue de Métallurgie, 1932, p. 442).

(2) Pour les propriétés du pyros et de la silice fondue, et leur emploi en pyrométrie, voir « Recherches expérimentales sur les alliages de fer, de nickel et de chrome » (Travaux et mémoires du Bureau international des Poids et Mesures, tome XVII, 1927).

(3) P. Chevenard : « Dilatomètre différentiel enregistreur » (Revue de Métallurgie, 1917, p. 610).

« Nouvelles applications du pyromètre à dilatation à l'analyse thermique des alliages » (Revue de Métallurgie, 1922, p. 546).

« Dilatomètres enregistreurs » (Journal de Physique, 1926, p. 240).

« Nouveaux appareils pour l'étude des transformations des alliages. Micro-dilatomètre isotherme. Thermomagnétomètre enregistreur » (Journal de Physique, 1932, p. 264).



DESCRIPTION DES DIVERS TYPES DE PYROMÈTRES A DILATATION

Il existe cinq types courants de pyromètres à dilatation :

Le type A, à cadran, est un simple indicateur de température;

Le type B, à cadran, est indicateur, avertisseur et régulateur de température;

Le type C, à enregistrement chronographique, est indicateur, enregistreur, avertisseur et régulateur de température;

Le type E, à enregistrement chronographique, est indicateur et enregistreur de température;

Le type F, à enregistrement chronographique, est indicateur, enregistreur, avertisseur et régulateur de température; il permet en outre de reproduire un cycle thermique donné.

Nous mentionnons également **le type D**, qui est un pyromètre double enregistreur destiné au contrôle des fours de trempe ou de revenu.

PYROMÈTRE A CADRAN (TYPE A)

A l'usage, les amplificateurs d'un mécanisme compliqué se sont révélés peu fidèles. Celui du pyromètre à cadran se réduit à un simple levier L (fig. 1) monté sur pivot d'horlogerie et rappelé par un ressort. La dilatation de l'étalon de pyros E, contenu dans le tube de silice T, est transmise par la tige de silice t et le coulisseau d'acier c à une pointe mousse qui termine le petit bras du levier L. Grâce aux soins

fermé par une pastille de silice parfaitement dressée et fixée par soudure. Ainsi l'étalon s'appuie correctement sur le fond du tube et le contact se fait par une large surface, ce qui permet, à la fois, d'utiliser des ressorts de rappel assez énergiques pour surmonter les frottements, et de réduire à quelques grammes par mm² la fatigue du métal. D'où, une très faible déformation visqueuse de l'étalon et de la silice :

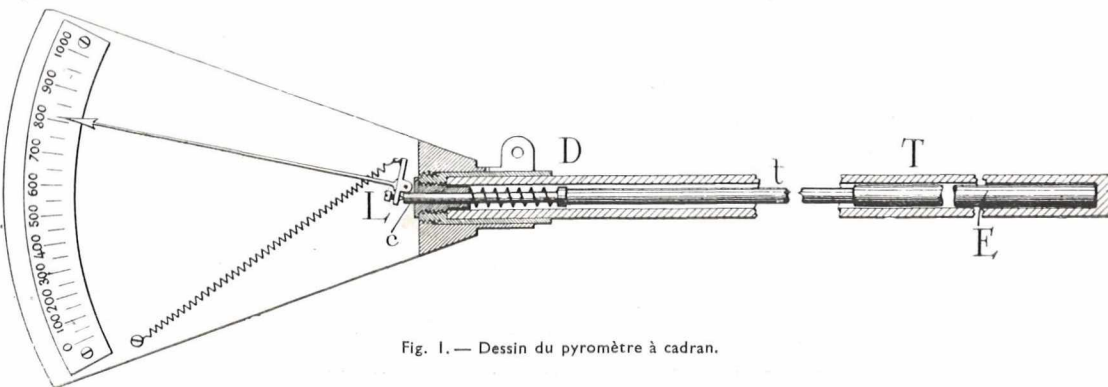


Fig. 1. — Dessin du pyromètre à cadran.

apportés à l'exécution des pivots, l'hystérésis mécanique de cet amplificateur est négligeable.

Le barreau de pyros de 5 ou 7 mm. de diamètre est terminé par deux sphères à grand rayon. Le tube de silice T aux parois épaisses de 1,5 ou 4 mm., est

après un séjour de plusieurs heures à 1.000°, le déplacement du zéro est négligeable. Par contre, la déformation visqueuse par séjour prolongé à 1.100° devient appréciable et entraîne un décalage de l'échelle thermométrique d'environ 4 degrés



heure. C'est pourquoi nous avons limité à 1.000° le domaine d'emploi de nos pyromètres et, par conséquent, l'étendue de leur graduation.

Les dilatations de la tête de l'appareil et du coulisseau sont compensées par un choix convenable de leurs dimensions et de leur dilatabilité; le levier L est en invar. Ainsi, les variations de la température ambiante n'ont aucune influence sur les indications du pyromètre.

A son extrémité ouverte, le tube de silice est masticqué dans une douille de laiton vissée dans la tête de l'appareil. Le blocage est assuré par une douille fendue à collier de serrage (fig. 2). Il suffit de desserrer le collier et de tourner légèrement le tube sur lui-même pour faire mouvoir l'aiguille; le réglage initial est donc très facile. Il en est de même pour la rectification du zéro, si cette correction devient nécessaire après long séjour à haute température.

Pour ce réglage, qui consiste à placer l'aiguille en face du trait correspondant à la température ambiante, lue

sur un thermomètre ordinaire, il est avantageux de placer le pyromètre dans la position de fonctionnement : tube horizontal ou vertical, selon que l'appareil doit être utilisé dans l'une ou l'autre de ces deux positions.

Un carter métallique protège le mécanisme amplificateur.

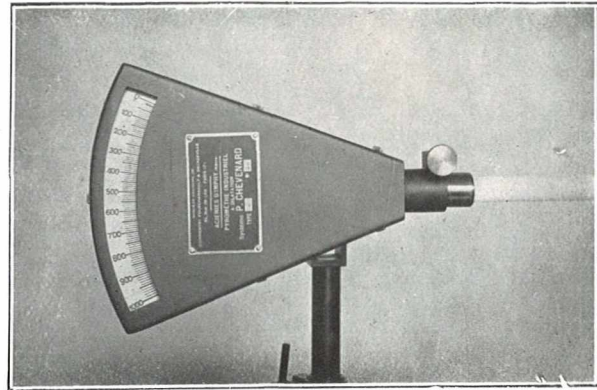


Fig. 2. — Pyromètre à cadran type A.

PYROMÈTRE A CADRAN, AVERTISSEUR, RÉGULATEUR DE TEMPÉRATURE (TYPE B)

Une légère modification permet de rendre l'appareil avertisseur ou de lui faire jouer le rôle de régulateur de température. Il suffit d'ajouter un bras B_2 (fig. 3),

convenablement isolé, mobile autour d'un axe situé dans le prolongement de celui de l'aiguille, et portant deux lames flexibles L_2 en argent. Ce bras est muni

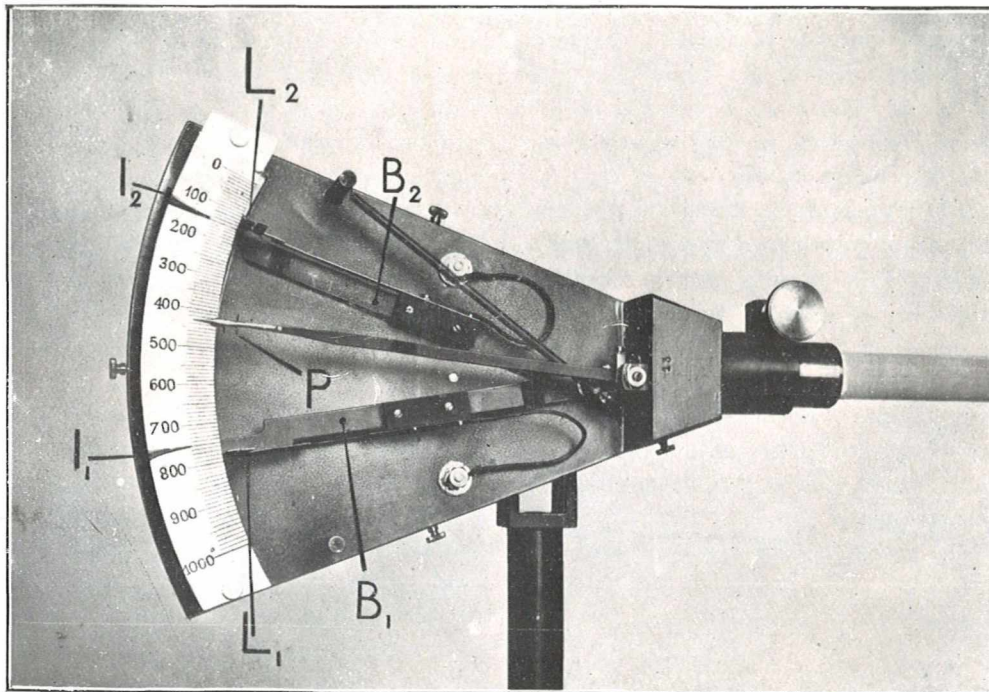


Fig. 3. — Vue du mécanisme avertisseur-régulateur du pyromètre type B.



d'un index I_2 que l'on amène à coïncider avec le trait du cadran correspondant à la température visée. Quand cette température est atteinte, l'aiguille vient toucher la lamelle L_2 par une de ses pointes p . Un circuit se ferme et l'avertisseur ou le relais entre en action. Ce relais intervient pour modifier l'intensité du courant de chauffe dans le cas d'un four électrique, ou le débit du gaz, de l'huile, dans le cas

manœuvrés de l'extérieur du carter de l'avertisseur par de petites poignées à vis mobiles dans une rainure de la platine arrière.

La figure 4 donne le schéma de montage du pyromètre type B, utilisé pour le réglage de la température d'un four électrique de laboratoire. L'installation comporte : un pyromètre type B, un four F, un relais type A, un rhéostat Rh, un ampèremètre Am et un transformateur auxiliaire T, donnant 8 volts au secondaire.

Supposons l'index I_2 du pyromètre en regard de 800° : lorsque l'aiguille A_i indique cette température, une de ses pointes touche le bras B_2 . A ce moment, un courant est lancé dans la bobine du relais, celui-ci bascule, la goutte de mercure de l'interrupteur se divise et le courant s'interrompt. Le four se refroidit, mais dès que la pointe de l'aiguille a quitté le bras B_2 , le relais agit et lance de nouveau le courant : ainsi, la température visée se maintient constante à de faibles écarts près, écarts

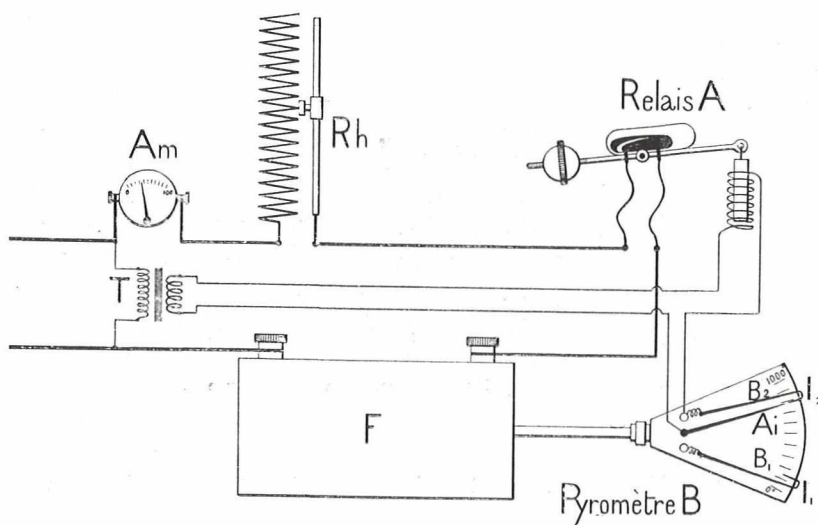


Fig. 4. — Schéma du montage du pyromètre régulateur type B, utilisé pour le réglage par « tout ou rien » de la température d'un four électrique de laboratoire.

d'un four à flammes, de manière à maintenir la température du four sensiblement constante.

Grâce aux forces intenses de la dilatation, le contact est franc et le fonctionnement sûr. Les deux lamelles d'argent sont reliées entre elles; la seconde ne joue qu'un rôle de sécurité au cas où une poussière rendrait imparfait le premier contact.

En pratique, il existe deux bras porte-contacts B_1 , B_2 , correspondant aux positions « trop froid » et « trop chaud ». Ils sont utiles dans la régulation non automatique pour indiquer au chauffeur, par deux signaux différents — par exemple lampe verte et lampe rouge ou par des sonneries — dans quel sens il doit agir pour ramener à la normale la température du four. En outre, ces deux bras sont nécessaires dans certains emplois de l'appareil comme régulateur automatique.

Les deux index correspondant aux deux bras sont

d'ailleurs amortis par l'inertie thermique des masses à chauffer.

Le montage de la figure 4 représente le réglage par « tout ou rien »; mais il est possible d'obtenir un réglage plus fin : au lieu d'interrompre le courant, le relais insère dans le circuit un tronçon supplémentaire de rhéostat, et l'intensité prend alternativement deux valeurs qui encadrent l'intensité de régime.

Pour assurer la conservation des contacts entre aiguilles et lamelles, il convient de limiter à une faible intensité le courant à interrompre. On peut couper directement le courant d'une lampe avertisseuse alimentée sur 110 volts et consommant 0,2 ampère environ. Dans l'emploi du pyromètre comme régulateur, le relais doit être relié à une source à basse tension : accumulateur 6 volts, ou transformateur 8 volts.



PYROMÈTRE A ENREGISTREMENT CHRONOGRAPHIQUE, AVERTISSEUR ET RÉGULATEUR DE TEMPÉRATURE (TYPE C).

Il suffit d'armer l'aiguille d'une plume et de remplacer le cadran par un tambour de chronographe (révolution en 24 heures) pour obtenir un pyromètre enregistreur (fig. 5).

Tout comme l'appareil à simple cadran, le pyromètre à enregistrement chronographique type C est muni de deux bras porte-contacts, et peut servir d'avertisseur ou de régulateur thermique. Il possède donc tous les avantages du pyromètre type B et, en outre, il enregistre fidèlement toutes les particularités du cycle thermique.

Un réseau de lignes correspondant à 100°, 200°... 1.000°, II, IV... XXIV heures, est gravé sur le tambour de l'enregistreur : il suffit d'utiliser une feuille à diagramme en papier calque pour lire en transparence l'heure et la température pour tout point de la courbe. Pour utiliser le diagramme, après essai, on le placera sur une grille reproduisant le développement de la graduation du tambour. Cette solution est beaucoup plus éco-

nomique que l'emploi de papiers à graduation imprimée d'avance.

Le schéma du montage est évidemment le même pour le pyromètre C que pour le pyromètre B.

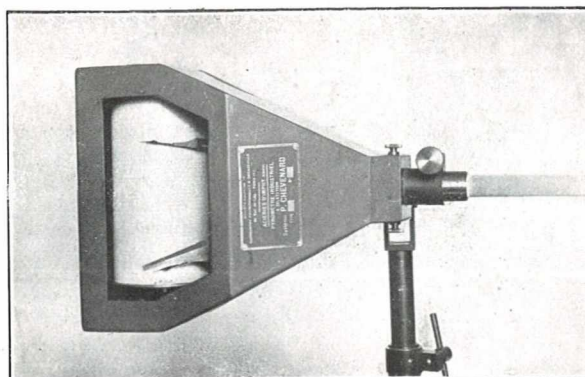


Fig. 5. — Pyromètre à enregistrement chronographique, avertisseur, régulateur de température type C.

PYROMÈTRE A ENREGISTREMENT CHRONOGRAPHIQUE (TYPE E)

Ce pyromètre, uniquement indicateur et enregistreur, ne comporte pas de bras de réglage. Il est donc réservé au contrôle des cycles thermiques.

Parmi ses applications, on peut citer le contrôle des fours électriques dans les machines destinées à

l'essai mécanique des alliages à haute température : dans ce cas, un dispositif de serrage spécial permet de fixer facilement le pyromètre sur la tige d'amarage de l'éprouvette.

PYROMÈTRE A ENREGISTREMENT CHRONOGRAPHIQUE, AVERTISSEUR, RÉGULATEUR DE TEMPÉRATURE, REPRODUCTEUR DE CYCLES THERMIQUES (TYPE F)

Cet appareil présente les mêmes avantages que le pyromètre C et permet, en outre, de faire varier la température d'un four suivant un cycle thermique donné d'avance.

Le principe consiste à remplacer le bras porte-contacts qui, par sa position fixe, maintient la température constante, par un contact mobile dont le déplacement réalise la marche désirée de la température en fonction du temps. Ce résultat est obtenu par l'emploi d'un gabarit métallique, découpé suivant la courbe « température-temps » à réaliser, et enroulé sur un tambour de chronographe (fig. 6).

Pour utiliser l'appareil à la reproduction d'un cycle,

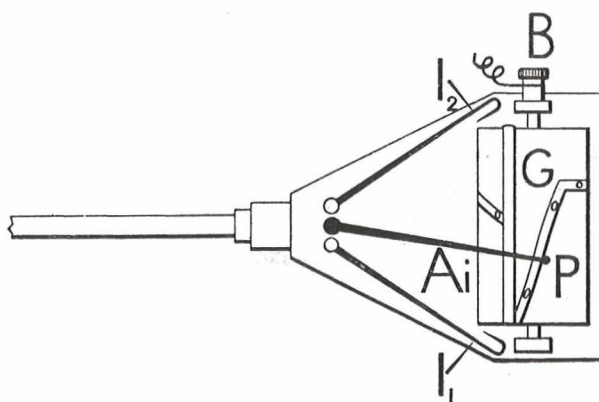


Fig. 6. — Schéma du montage du pyromètre type F.



on remplace la lame porte-plume de l'enregistreur par une aiguille Ai (fig. 6) munie d'une pointe d'argent P destinée à assurer le contact avec le gabarit G fixé sur le tambour.

du chronographe est mis en marche. Au départ le contact pointe-gabarit provoque la rupture du courant par le jeu du relais. Mais la rotation du tambour interrompt ce contact, le circuit électrique se ferme,

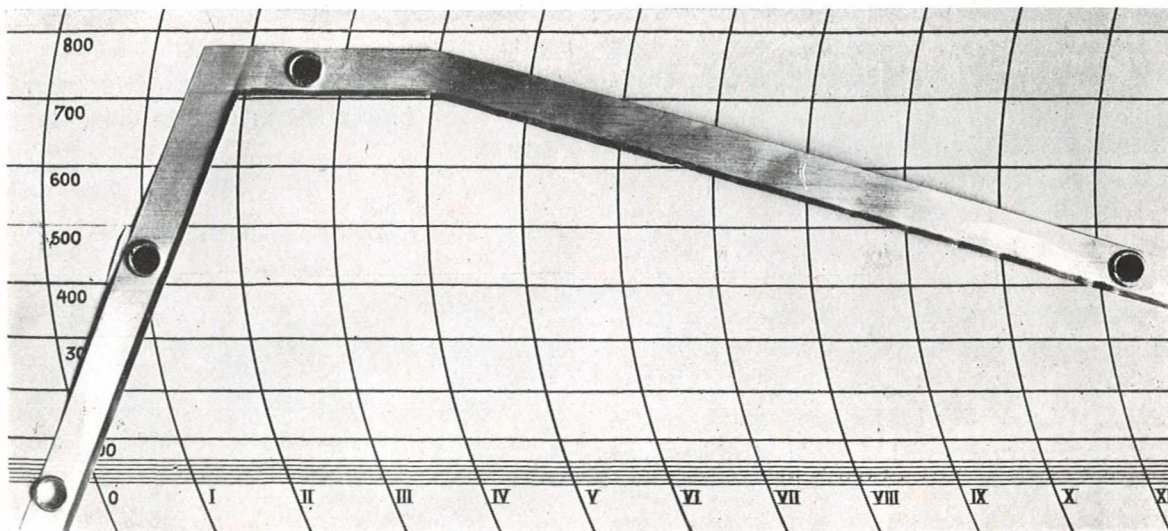


Fig. 7. — Gabarit servant au tracé d'un cycle thermique

Ce gabarit G est constitué par une mince feuille d'argent, découpée suivant la courbe « température-temps » visée, et agrafée sur la feuille de papier à diagramme. Le gabarit est en contact électrique avec la masse du mouvement; celui-ci est isolé du reste de l'appareil et la borne B, en connexion avec le mouvement, sert à insérer le gabarit dans le circuit du relais.

Au début de la chauffe, la pointe P est amenée au contact du gabarit, au point correspondant à la température ambiante. L'intensité de chauffage ayant été déterminée par quelques essais préalables, le tambour

le four s'échauffe et l'aiguille A dévie. Aussitôt le contact rétabli, le courant est coupé de nouveau, et ainsi de suite. La pointe accompagne donc le gabarit et la température du four décrit, à de petites oscillations près, le cycle imposé.

La figure 8, enregistrée par un pyromètre C, reproduit la marche d'un four de laboratoire commandé par un pyromètre régulateur type F.

Lorsque le pyromètre est utilisé en reproducteur de cycle, les bras porte-index I_1 et I_2 doivent être écartés de part et d'autre du tambour (fig. 6).

Toute surveillance au cours de l'opération est inu-

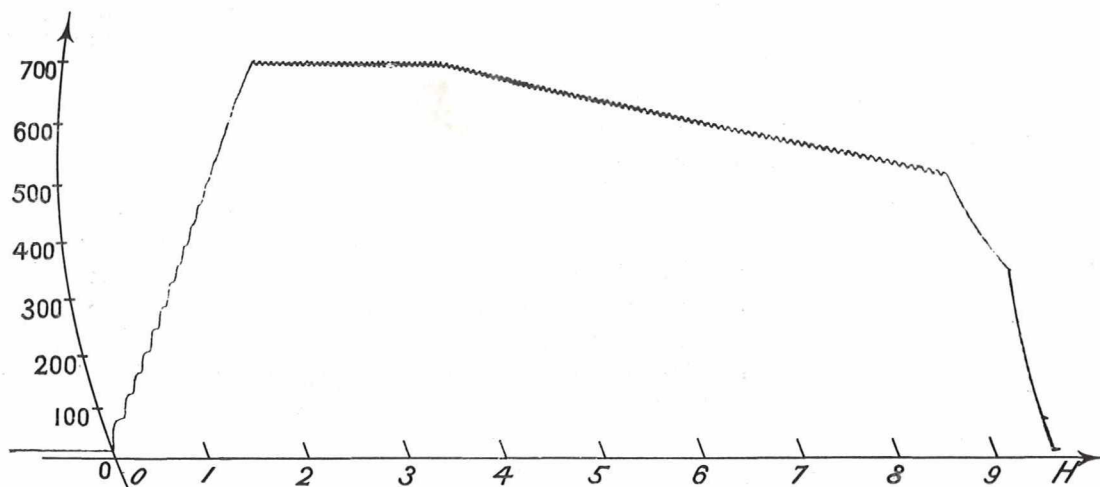


Fig. 8. — Cycle conforme au gabarit de la figure 7, obtenu avec un pyromètre type F.



tile, car l'intensité de courant admise au début convient pour toute la durée de l'essai; il suffit que cette intensité permette d'atteindre la température maximum du cycle. Il y a intérêt cependant à limiter cette intensité à la valeur indispensable, afin de réduire l'amplitude des oscillations thermiques au début de la chauffe.

La bande d'argent utilisée pour la confection du gabarit est de faible épaisseur : 0,07 à 0,10 mm.; la largeur est de 8 à 10 mm. Pour assurer la sécurité

du contact pointe-gabarit, on doit avoir soin de relever légèrement le rebord de la feuille d'argent, de manière à lui donner une certaine saillie par rapport au papier; il y a lieu, également, de vérifier souvent la propreté des pièces de contact.

Les graduations du tambour du pyromètre donnent les échelles des temps et des températures, à l'aide desquelles il est facile d'établir la courbe « température-temps » selon laquelle le gabarit doit être découpé.

PYROMÈTRE DOUBLE ENREGISTREUR (TYPE D)

Ce pyromètre n'est autre qu'un dilatomètre différentiel d'une simplicité quasi schématique (fig. 9 et 10).

Outre le barreau-étalon de pyros E_1 , il comporte

un diagramme portant une échelle thermométrique.

Le pyromètre double est destiné aux ateliers de trempe. Il repère la température d'un four, non

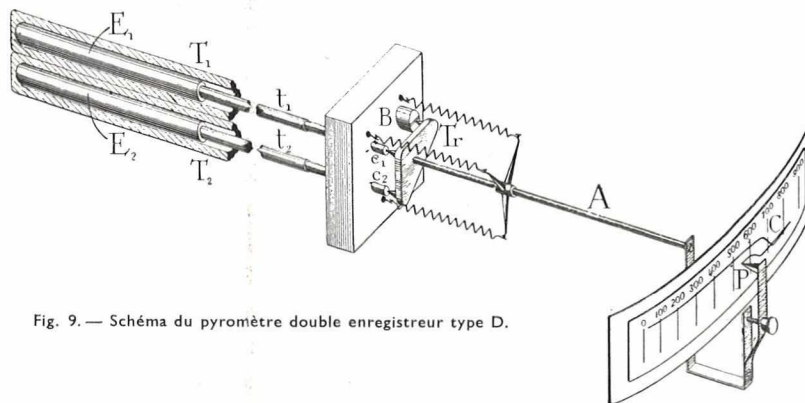


Fig. 9. — Schéma du pyromètre double enregistreur type D.

un barreau-échantillon E_2 formé de l'acier ou de l'alliage des pièces à traiter. Ces barreaux sont enfermés dans des tubes de silice T_1 , T_2 . Leurs dilatations sont transmises par des tiges de silice t_1 , t_2 , et des coulisseaux d'acier c_1 , c_2 , au trépied amplificateur Tr , armé d'un bras A . Les trois pointes du trépied dessinent un triangle rectangle, et celle qui reçoit la dilatation de l'étalon occupe le sommet de l'angle droit. Quand le pyromètre double est introduit dans le four, l'extrémité du bras A décrit la courbe de dilatation différentielle de l'alliage. Une plume P , fixée par une lamelle flexible à l'extrémité de l'aiguille, inscrit cette courbe C sur une feuille à

seulement par rapport à l'échelle usuelle, mais aussi par rapport aux températures critiques de l'alliage traité. Il permet donc des traitements très précis et contribue, en plus, à diffuser les notions scientifiques dans les ateliers.

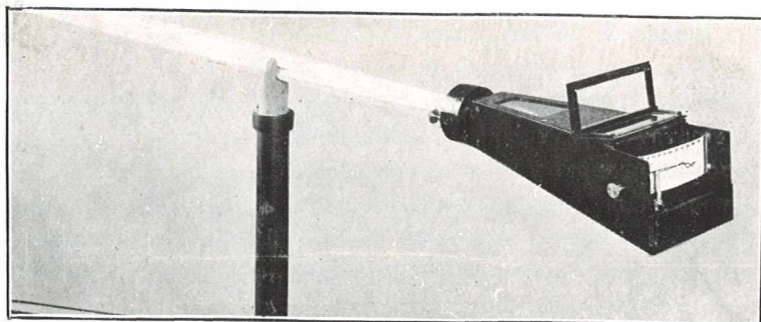


Fig. 10. — Pyromètre double enregistreur type D.



MODE D'UTILISATION DES PYROMÈTRES A DILATATION

Dans la construction des pyromètres à dilatation l'emploi de la silice s'impose pour plusieurs raisons : faible dilatabilité, faible conductibilité thermique, rigidité aux températures élevées, translucidité permettant le chauffage rapide, par rayonnement, de l'étalon pyrométrique.

Le tube de silice peut donner l'impression d'être fragile. Pour le rendre plus robuste, deux idées viennent immédiatement à l'esprit : protéger le tube de silice par un fourreau métallique ; inverser les rôles de la silice et du pyros, c'est-à-dire adopter l'alliage pour le tube et la tige de transmission et prendre un étalon de silice. L'expérience a condamné ces prétendus perfectionnements.

Un fourreau métallique a l'inconvénient d'échauffer par conductibilité le mécanisme du pyromètre, et surtout il ne protège pas du tout les pièces de silice. Son action est nulle si l'intervalle annulaire entre le tube et le fourreau est laissé vide ; elle est franchement nuisible s'il existe un bourrage de matières meubles, comme le sable ou l'amiante. Quand un tube métallique est brusquement introduit dans un four chaud, la température croît très vite, et jamais à la même vitesse en tous les points d'une même section droite : le fourreau se courbe, et cette arcure, transmise par le bourrage au tube de silice, en provoque presque toujours la rupture.

Quant au montage « inverse » : tube et tige de pyros, étalon de silice, il a les mêmes défauts de l'arcure et de la conduction de chaleur ; il est surtout peu précis. Le fonctionnement correct du pyromètre suppose une exacte compensation des dilatations de la tige de silice et du tronçon en regard du tube de silice qui la renferme. Cette condition est sensi-

blement réalisée avec des pièces de silice, même pendant la période de chauffe, parce que si le tube et la tige ne sont pas tout à fait en équilibre thermique, la très faible dilatabilité de la silice ramène l'erreur au second ordre. Il en est tout autrement avec le pyros, trente fois plus dilatable.

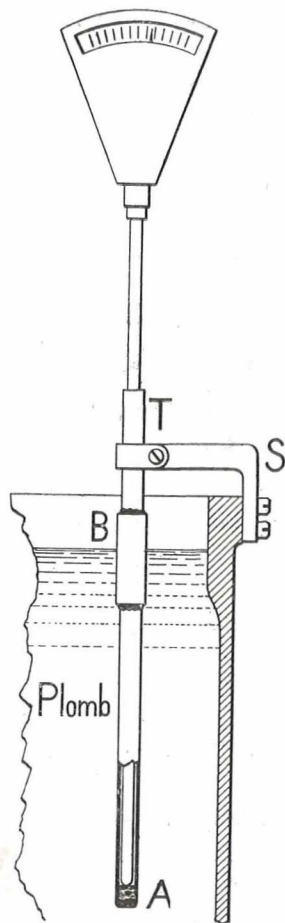


Fig. 11. — Montage du pyromètre à dilatation dans un bain de plomb.

En réalité, le pyromètre à tube de silice nu ne s'est pas révélé d'une fragilité excessive. L'industrie livre maintenant des verres de silice peu cassants, et le tube T est à parois épaisses. Aussi, malgré leur apparence fragile, les tubes de silice sont-ils assez robustes pour être manipulés sans difficulté. Ils peuvent supporter impunément les chauffes les plus rapides.

Si le milieu chauffé n'altère pas la silice et si les chocs ne sont pas à craindre, il est préférable d'introduire dans le four le tube de silice nu ; l'inertie du pyromètre est alors réduite au minimum.

Si le milieu n'altère pas la silice, mais si les chocs sont à redouter, il est prudent de protéger la canne à l'aide d'un tube borgne, en fer ou en Nicral (1), ajouré latéralement à son extrémité fermée sur une longueur de 15 à 20 cm.

Si l'appareil doit être placé dans un bain de sel, de métal ou d'une substance quelconque capable d'altérer chimiquement la silice, un tube métallique de nature appropriée, complètement fermé à l'une de ses extrémités, est indispensable. Dans le cas d'un bain de métal, il est recommandé de munir le tube T d'une bague B placée au niveau du bain : l'attaque étant très marquée à cet endroit, la bague

(1) Cf. à ce sujet la notice " Alliages réfractaires ".



prolonge la durée du tube (fig. 11). En renforçant le tube seulement au niveau du bain, on garde l'avantage d'une épaisseur plus faible dans la région de l'étalon et, par suite, d'une plus grande rapidité d'indications.

Le tube protecteur ne doit pas être fixé à la tête de l'appareil pour trois raisons :

1° Les chocs reçus par le protecteur seraient transmis à l'appareil et au tube de silice ;

2° Aux températures élevées, la déformation du moufle par viscosité pourrait provoquer la rupture du tube ;

3° La conductibilité thermique du moufle risquerait d'échauffer exagérément le mécanisme de l'appareil.

En général, le tube protecteur doit être fixé à demeure et d'une manière indépendante du pyromètre, dans l'installation où l'on veut déterminer la température.

Il est quelquefois nécessaire de ménager un certain jeu entre le tube métallique et la canne de silice, pour éviter de transmettre au pyromètre les chocs éventuels reçus par le tube. Ce jeu permet en outre d'éviter le coincement de la canne lorsque le tube se déforme. Il y a d'ailleurs lieu de fixer le tube métallique de telle sorte que ses déformations par viscosité à haute température soient supprimées ou réduites au minimum. Ainsi un tube métallique, disposé horizontalement dans un four et encastré à une de ses extrémités seulement, s'incurvera à chaud et pourra provoquer la rupture de la canne. Cet inconvénient sera évité en supportant le tube métallique en différents points, ou, s'il est possible, en plaçant verticalement la canne du pyromètre. Toutes choses égales d'ailleurs, un tube en Nicral se déforme beaucoup moins qu'un tube en fer.

Afin de ménager un jeu latéral, on peut prévoir, pour les cannes de silice de 16 mm. de diamètre et de 1 mètre à 1 m. 400 de longueur, un tube métallique protecteur de 35 mm. de diamètre intérieur et 40 à 45 mm. de diamètre extérieur. Pour les cannes plus courtes, on peut adopter 30 mm. de diamètre intérieur et 35 à 40 mm. de diamètre extérieur.

Si le tube protecteur est placé verticalement, ou s'il est placé horizontalement, mais soutenu sur toute sa longueur, ou si la température maximum d'emploi ne provoque aucune déformation du tube par viscosité, son diamètre intérieur peut n'excéder que de quelques millimètres le diamètre extérieur de la canne de silice.

Quand le pyromètre est placé verticalement, il est bon de déposer un tampon d'amiante A au fond du tube protecteur (fig. 11), afin d'épargner les chocs à la canne de silice, au moment de la mise en place de l'appareil.

Les pyromètres fonctionnent dans toutes les positions, et des supports quelconques peuvent être utilisés pour les soutenir. L'échelle de température occupe un arc de 115 mm. environ et peut avoir pour étendue 300, 600 ou 1.000 degrés. Le tableau ci-dessous donne les longueurs et diamètres des tubes de silice et des étalons pour ces différentes échelles.

Température maximum de l'échelle	Diamètre extérieur du tube de silice	Longueur du tube de silice	Diamètre des étalons	Longueur des étalons
300°	16 mm.	{ 0 m. 600 { 1 m. { 1 m. 400	7 mm.	225 mm.
	8 mm.	{ 0 m. 600 { 0 m. 450	5 mm.	225 mm.
600°	16 mm.	{ 0 m. 600 { 1 m. { 1 m. 400	7 mm.	150 mm.
	8 mm.	{ 0 m. 600 { 0 m. 450	5 mm.	150 mm.
1.000°	16 mm.	{ 0 m. 600 { 1 m. { 1 m. 400	7 mm.	150 mm.
	8 mm.	{ 0 m. 600 { 0 m. 450	5 mm.	150 mm. 100 mm.

Il est préférable de ne pas enlever sans motif le poussoir et l'étalon des pyromètres. Si, pour une raison quelconque, on est obligé de sortir l'étalon, il faut avoir soin d'effectuer le nouveau montage en disposant horizontalement le tube de silice et en faisant avancer l'étalon lentement, à l'aide du poussoir de silice : le fond du tube de silice ne peut résister au choc d'un étalon engagé sans précautions.

RELAIS



L'emploi d'un relais est indispensable quand on veut utiliser les pyromètres comme régulateurs de température.

Différents types de relais ont été étudiés pour répondre aux différents modes de régulation qu'on peut envisager en pratique. Nous nous bornerons ici à mentionner le relais type A, le plus employé, tous renseignements pouvant être fournis sur demande pour les autres types répondant à des besoins particuliers.

Le relais type A, dont le schéma a été donné dans la figure 4 et dont le fonctionnement a été décrit à propos du pyromètre type B, permet :

- a) Le réglage direct des fours électriques alimentés en courant continu, ou en courant alternatif monophasé ;
- b) Avec l'aide d'un contacteur, le réglage de fours électriques alimentés en courant triphasé ;
- c) Avec l'aide d'un contacteur et de vannes automatiques, le réglage de fours chauffés au gaz, à l'huile, au charbon pulvérisé, etc.

Le relais type A peut également servir à couper

définitivement le courant, pour assurer le refroidissement du four lorsque la température visée est atteinte. Dans ce cas, le contrepoids du relais est réglé de telle sorte que le bras supportant l'interrupteur soit en équilibre indifférent. Dans ces conditions, lorsque l'interrupteur a basculé, il se maintient dans cette position et le courant reste coupé.

Les relais sont protégés par un carter. Ils fonctionnent sous faible tension et absorbent environ 0,4 ampère. On peut utiliser une batterie d'accumulateurs de 6 volts ou un petit transformateur donnant 8 volts au secondaire. Les interrupteurs à mercure admettent une intensité maximum de 15 ampères sous 220 volts. Si les fours utilisés admettent un courant plus intense, les relais commanderont des contacteurs appropriés à leur régime.

Signalons la possibilité d'adjoindre aux pyromètres un contacteur horaire, destiné à mettre en chauffe ou à faire refroidir un four électrique, à une heure fixée d'avance. On réalise ainsi l'automatisme la plus complète, non seulement pour la régulation de la température, mais pour la mise en marche et l'arrêt d'un four, selon un programme horaire déterminé.

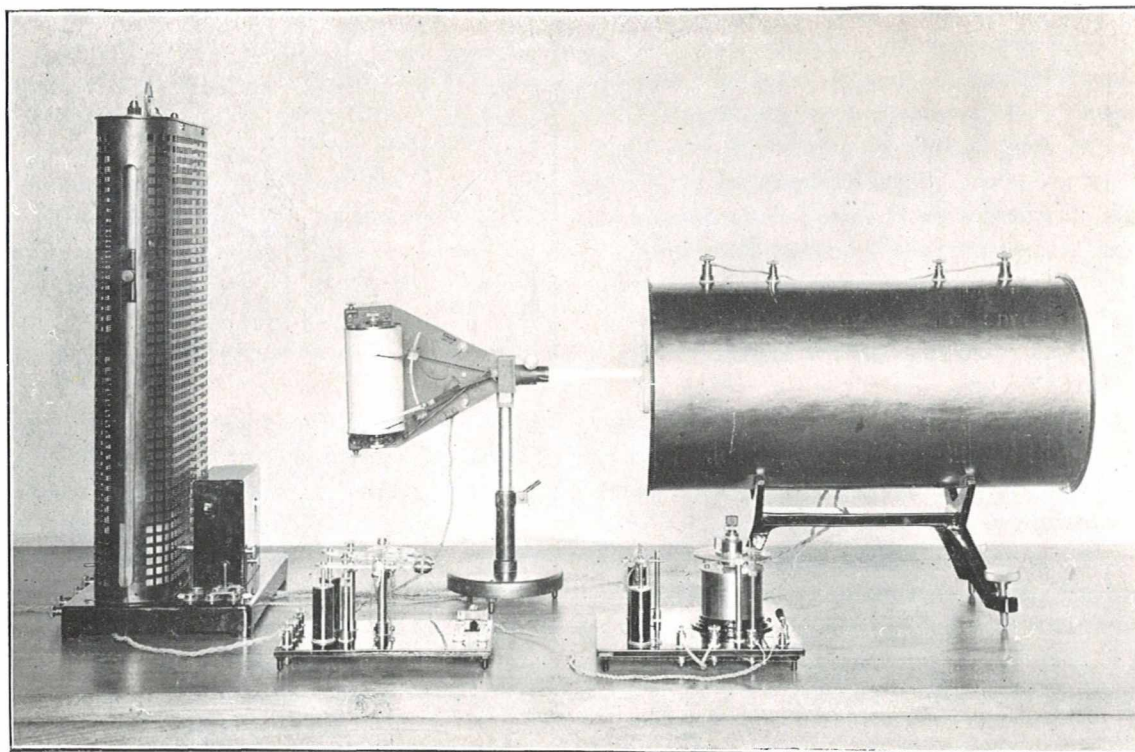


Fig. 12.— Régulation d'un four de laboratoire au moyen d'un pyromètre type C, avec rhéostat automatique à trois curseurs, relais et contacteur horaire.



QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATIONS DES PYROMÈTRES A DILATATION

La figure 13 groupe deux courbes tracées par un pyromètre type C chargé, à la fois, de maintenir dans un four de laboratoire (fig. 12) une température de 700° et d'enregistrer le diagramme « température-temps »; le tube de silice a 8 mm. de diamètre et 450 mm. de longueur. Au pyromètre est associé un rhéostat automatique à trois curseurs et un relais. La première courbe correspond au réglage par « tout ou rien », l'autre au réglage plus fin entre deux intensités qui encadrent l'intensité de régime. Ce deuxième montage ramène, de ± 3 degrés à $\pm 1,5$ degré, l'amplitude des fluctuations thermiques.

On voit dans les figures 14 et 15 l'utilisation des pyromètres à dilatation dans un atelier de traitements thermiques de précision : l'installation comprend un four à bain de sels d'une puissance de 7 kw, un four à bain de plomb de 18 kw et deux fours à moufle

de 30 kw. Les objets soumis à la trempe, au recuit et au revenu : éprouvettes d'essai, petites pièces de mécanique fine, etc., exigent des conditions de chauffe rigoureuses : aussi a-t-on cherché l'automatisme dans la description des cycles « température-temps » selon un programme minutieusement étudié.

La fidélité de cette description, c'est-à-dire la **finesse du réglage**, dépend au plus haut point de l'emplacement du pyromètre régulateur dans l'appareil de chauffe. Il suffit, pour s'en rendre compte, de réfléchir au mécanisme des oscillations thermiques entretenues.

Soit d'abord, le pyromètre régulateur disposé au centre d'un four à moufle. Supposons, pour l'instant, l'intensité d'alimentation supérieure à l'intensité de régime : la température de l'enroulement de chauffe dépasse la normale et cet excès se transmet progressivement au pyromètre, par conduction et rayonne-

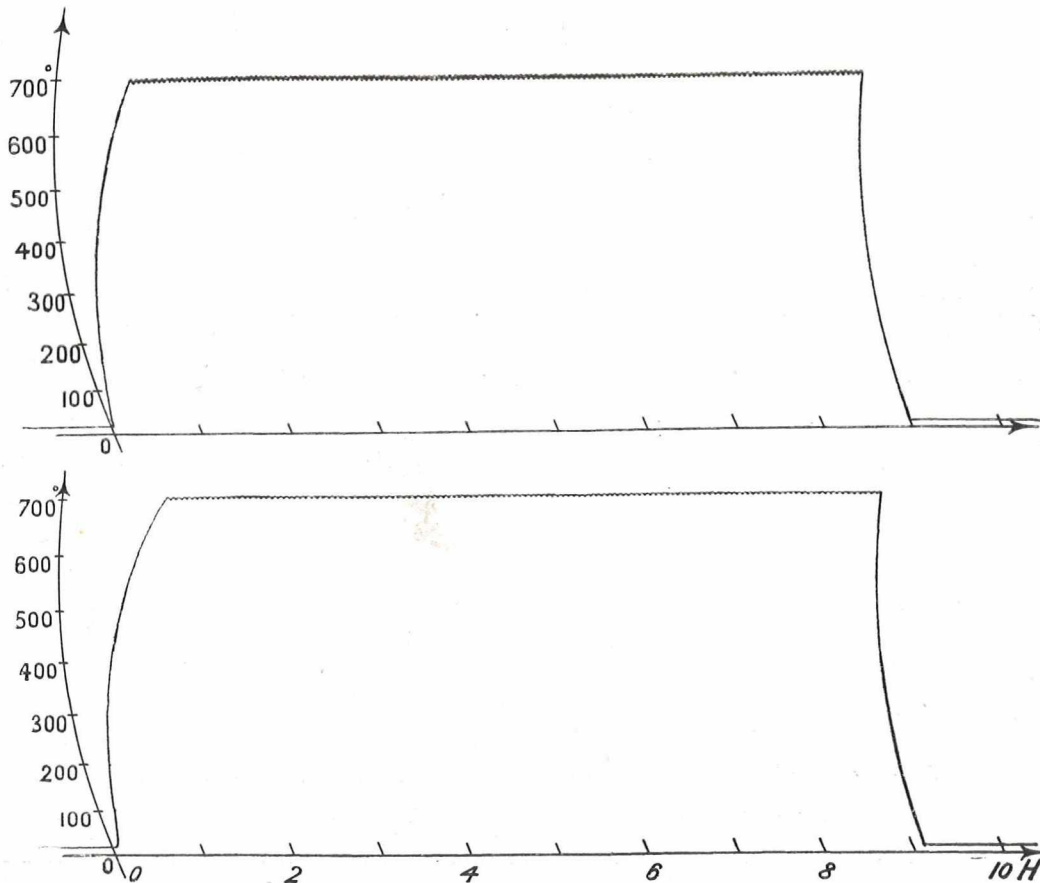


Fig. 13. — Courbes isothermes obtenues à l'aide d'un pyromètre régulateur

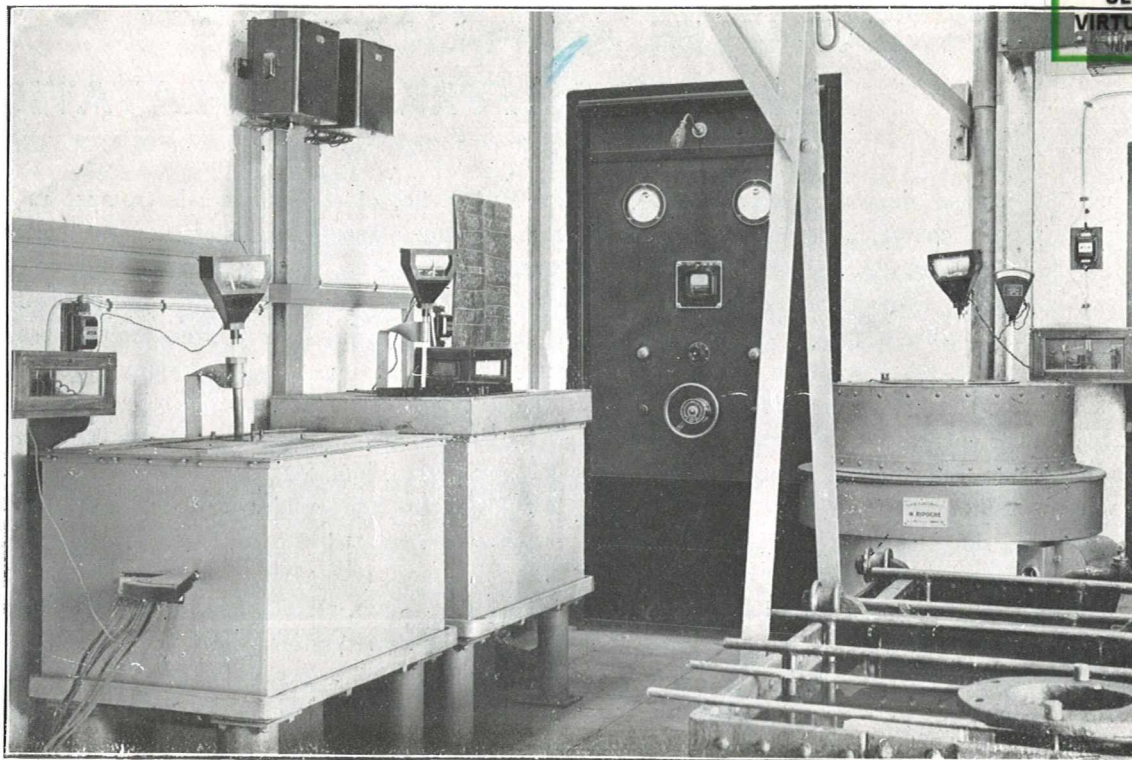


Fig. 14.

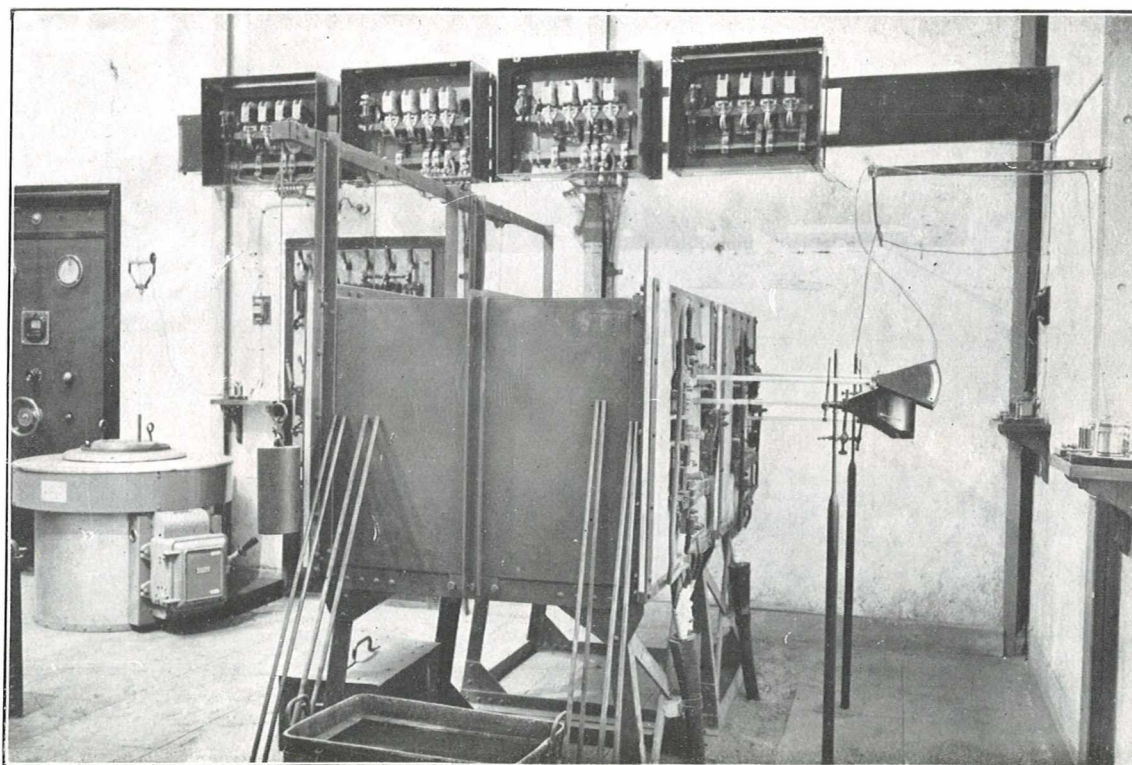


Fig. 14 et 15. — Vues d'un petit atelier pour traitements thermiques de précision : éprouvettes, pièces de mécanique fine.



ment, à travers les parois du moufle, la masse des objets à chauffer et l'atmosphère du four. Le régulateur agit alors, mais avec un retard appréciable, d'autant plus long que la transmission de l'excès thermique a été plus lente. Aussi, bien que l'intensité de chauffe ait été réduite, par le jeu du régulateur, les parois du four continuent à échauffer le pyromètre et la température s'élève, pendant un certain temps, au delà du degré assigné par le réglage. Un raisonnement analogue fait prévoir une baisse au-dessous de la normale quand la température tend à diminuer. D'où, oscillations entretenues dont l'amplitude croît avec la lenteur des transmissions thermiques.

Pour obtenir un réglage fin, il faut donc **placer l'organe régulateur à proximité immédiate du circuit de chauffage**. Cette disposition est représentée dans la figure 16, relative au four à moufle de 30 kw. Le pyromètre B chargé du réglage isotherme est à l'intérieur du moufle, presque au contact des conducteurs R du résistor; le pyromètre C joue le rôle d'un simple enregistreur de la courbe « température-temps ». Dans ce cas, l'inertie thermique du four agit dans un sens favorable, et le simple réglage par « tout ou rien » donne d'excellents résultats. La courbe obtenue (deuxième courbe, fig. 17) en effet est presque une droite horizontale, alors

que le régulateur placé au centre du four conduit à d'amples oscillations (première courbe, fig. 17).

Bien entendu, on peut réaliser systématiquement ces oscillations entretenues, par exemple pour obtenir certaines modifications structurales : il suffit de placer le régulateur au centre du four, et de ralentir la transmission de la chaleur par un manchon réfractaire.

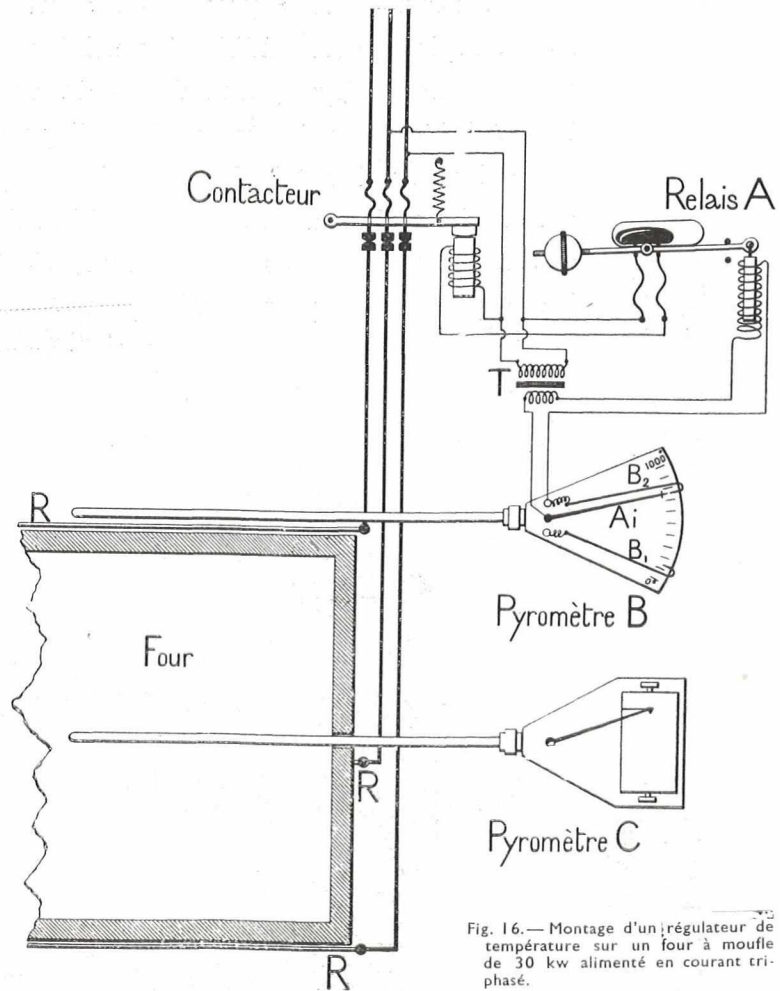


Fig. 16. — Montage d'un régulateur de température sur un four à moufle de 30 kw alimenté en courant triphasé.

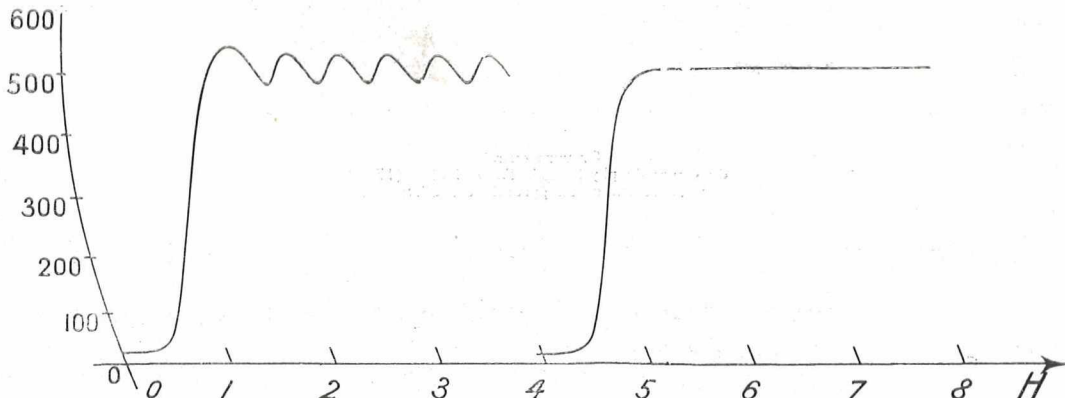
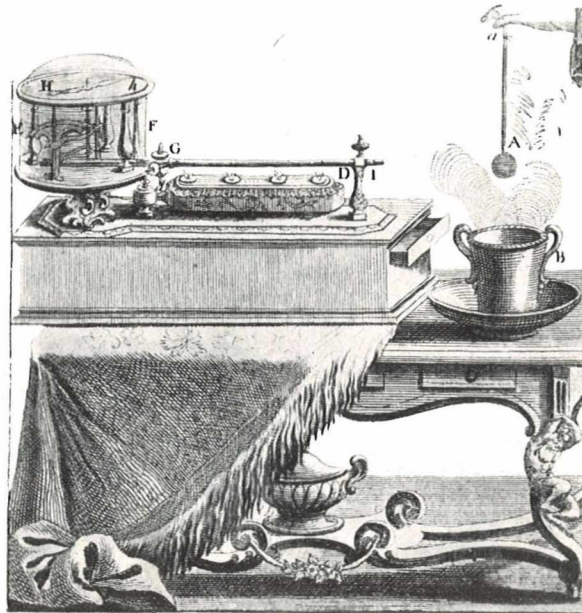


Fig. 17. — Courbes démontrant l'influence de l'emplacement du pyromètre régulateur sur l'amplitude des oscillations thermiques. Première courbe : pyromètre au centre du four. Deuxième courbe : pyromètre au voisinage immédiat du résistor.



CONCLUSIONS

En résumé, les pyromètres décrits dans cette notice sont simples, précis, fidèles, insensibles aux trépidations, aux champs magnétiques, aux fuites de courant, pratiquement indéréglables et robustes malgré l'apparente fragilité de la silice. Ils se prêtent à de multiples emplois, au laboratoire comme à l'atelier, assurent la précision des essais thermiques et l'automatisme des traitements, c'est-à-dire contribuent à une production plus rapide, plus sûre et plus économique.



Gravure extraite
du Cours de physique de l'abbé Nollet (1749)
et représentant un pyromètre à dilatation.



APPAREILS système P. CHEVENARD

Appareils d'analyse thermique.

Analyse dilatométrique des matériaux :

- Analyseur thermique.
- Dilatromètre différentiel à enregistrement photographique.
- Dilatromètre différentiel à enregistrement mécanique.
- Dilatromètre triple.
- Dilatromètre à sensibilité réglable.
- Dilatromètre à fil.

Étude des réactions d'instabilité des alliages :

- Microdilatomètre isotherme.

Étude de l'action de la température sur les propriétés électriques des alliages :

- Galvanopyromètre.

Analyse thermomagnétique :

- Thermomagnétomètre enregistreur.

Appareils d'essais mécaniques des métaux.

- Extensomètre enregistreur.
- Machine de traction complète pour essais à chaud.
- Relaxomètre enregistreur.

Appareillages régulateurs de température.

- Rhéostats automatiques.
- Appareillage régulateur à fil dilatable.
- Fours à réglage automatique.
- Pyromètres industriels à dilatation.