

THERMOMÈTRES - PYROMÈTRES & THERMO-RÉGULATEURS

à tension de Vapeurs Saturées

Indicateurs, Enregistreurs ou Régulateurs
de la température à distances facultatives
dans toute l'étendue de l'échelle des températures industrielles

(Brevetés S. G. D. G. en France et à l'Étranger)

APPLICABLES

Dans les mesures de précision

Dans les diverses branches de l'Industrie Métallurgique

Dans l'Industrie Sucrière, etc... En Médecine, en Chirurgie

Dans les usages Domestiques, etc.

PAR

M. J. B. FOURNIER

ATTACHÉ AU LABORATOIRE DES RECHERCHES PHYSIQUES DE LA SORBONNE

Communiqué par la Société en commandite par actions, dite :

SOCIÉTÉ DES APPAREILS FOURNIER

SIÈGE SOCIAL : 11. RUE CAMPAGNE-PREMIÈRE, PARIS (XIV^{ME})

Administrateur-Gérant : M. FOURNIER

Président du Conseil de Surveillance :

M. J.-J. PILLET

Professeur

au Conservatoire National des Arts-& Métiers
à l'École des Ponts-& Chaussées et à l'École Polytechnique
Officier de la Légion d'Honneur

THERMOMÈTRES-PYROMÈTRES & THERMO-RÉGULATEURS

à tension de Vapeurs Saturées

A. G. - B.
Ames 1924

Indicateurs, Enregistreurs ou Régulateurs
de la température à distances facultatives
dans toute l'étendue de l'échelle des températures industrielles

(Brevetés S. G. D. G. en France et à l'Étranger)

APPLICABLES

Dans les mesures de précision
Dans les diverses branches de l'Industrie Métallurgique
Dans l'Industrie Sucrière, etc... En Médecine, en Chirurgie
Dans les usages Domestiques, etc.

PAR

M. J. B. FOURNIER

ATTACHÉ AU LABORATOIRE DES RECHERCHES PHYSIQUES DE LA SORBONNE

Communiqué par la Société en commandite par actions, dite :

SOCIÉTÉ DES APPAREILS FOURNIER

SIÈGE SOCIAL : 11, RUE CAMPAGNE-PREMIÈRE, PARIS (XIV^{ME})

Administrateur-Gérant : M. FOURNIER

Président du Conseil de Surveillance :

M. J.-J. PILLET

Professeur

au Conservatoire National des Arts-&Métiers
à l'École des Ponts-&Chaussées et à l'École Polytechnique
Officier de la Légion d'Honneur

INTRODUCTION

Grâce à leur principe et à leur disposition qui permettent d'évaluer la température en un lieu aussi éloigné qu'on le désire du lieu d'observation, les appareils dont la description et la critique suivent rendront certainement de grands services aussi bien dans les mesures de précision que dans l'Industrie.

Comme nous le verrons dans la suite, la température est transmise aux organes indicateurs, inscripteurs ou régulateurs, par un petit tube métallique flexible qui peut être aussi long qu'on le désire et qui porte à son extrémité une ampoule minuscule qui est *la seule partie sensible* de l'appareil. Il suffira donc de mettre en relation cette partie sensible avec le milieu dont on veut connaître, enregistrer ou régulariser la température.

Cette disposition commode, qui rend facile l'*exploration* du milieu thermique sans avoir à toucher aux appareils, jointe à la grande précision de ces derniers, rend leur usage indispensable dans un grand nombre d'applications dont voici les principales.

Industrie. — Dans la grande métallurgie du fer, de l'acier et autres métaux ; hauts fourneaux, cubilots, creusets.

Céramique et industries connexes.

Dans les sucreries et distilleries, fabrication des alcools, liqueurs, extraits.

Dans les brasseries, cuves de fermentation.

Dans les industries relatives aux applications de caoutchouc : vulcanisation, imperméabilisation des tissus, etc., etc.

Séchoirs de toutes natures pour bois, cuirs, cartons, pâtes alimentaires.

Préparation et fermentation des tabacs.

Préparation des produits chimiques et pharmaceutiques.

Médecine, Chirurgie, Hygiène. — Température des malades. Facilité pour le médecin ou son aide de prendre la température d'un malade avec une très grande précision sans toucher à l'appareil par développement du tube flexible et placement convenable de l'ampoule sensible. Faculté d'enregistrer cette température en fonction du temps et cela pendant tout le temps voulu sans aucune fatigue pour le malade ni surveillance du médecin, alors même que le malade est plongé dans un bain (typhiques) ou soumis à l'action du chloroforme (opérés).

En chirurgie : pour la température des étuves à stérilisation des instruments et objets de pansement, pour les étuves à désinfections sèches ou humides, pour la préparation des bains locaux et généraux.

Les appareils ne seront pas moins intéressants et utiles

dans les usages domestiques et les applications à l'hygiène. Ils permettront au particulier, soucieux de sa santé, de surveiller et de régler la température de son bain ou d'apprécier, du coin de son feu ou au moment de sortir, les différences de température extérieures ou intérieures, facteurs de la plupart des maladies aiguës dites refroidissement. Grâce à ces appareils, il sera loisible à chacun de connaître, sans se déplacer, la température de lieux éloignés, celle de différentes pièces d'un appartement comme celle de la rue ou du jardin.

Enfin, il est des cas où la faculté d'évaluer et de régler les températures à très grande distance rendra d'inappréciables services ; par exemple, pour un contremaître ou un directeur d'usine qui sera renseigné à son bureau même et par une *simple lecture*, sur la température et par suite sur la pression de ses générateurs de vapeur, dont il pourra régler la température sans se déranger, le thermomètre constituant, dans ce cas, un remarquable instrument de contrôle et de sécurité.

Mesures de précision. — Laboratoires de physique, chimie, observatoires, stations météorologiques, etc.

Nous voyons que les appareils qui nous occupent et dont les avantages sont contradictoirement exposés et discutés ci-après, n'ont pas seulement la prétention de combler de sérieuses lacunes existant dans l'évaluation et la mesure des températures industrielles, mais aussi d'être plus parfaits que les thermomètres et thermo-régu-

lateurs de précision employés jusqu'ici dans les recherches purement scientifiques.

Nous diviserons cette discussion en deux parties : partie industrielle (en gros caractères), partie scientifique (caractères réduits).

Principe des appareils

L'organe essentiel de l'appareil dont il vient d'être question est constitué par un tube en acier *c a b*, figure 1, à section elliptique, roulé en forme de *tore*.

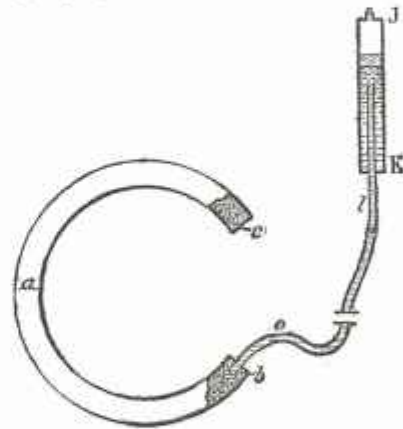


Fig. 1.

Après avoir rempli ce tube d'une matière inerte et peu dilatable, telle que du sable, on ferme ses deux extrémités au moyen de deux bouchons soudés sur le tube.

Dans le bouchon *b* s'engage un tube flexible *b e l*, dont on peut faire varier la longueur à volonté.

Ce petit tube généralement capillaire est fixé sur le bouchon *b* par soudure autogène ou à l'argent et communique avec l'intérieur du tore.

Son autre extrémité est mise en relation avec une capacité de contenance déterminée, constituée soit par un tube unique JK, soit par un faisceau de tubes métalliques. Quelle que soit la forme de cette capacité, l'extrémité ouverte du petit tube est placée à son intérieur de telle sorte que tous les plans passant par cette extrémité divisent sensiblement en deux parties égales la capacité en question, quelle que soit l'orientation de ces plans.

On introduit d'abord dans ce système un liquide aussi peu volatil que possible, tel qu'une huile convenable ou du mercure, de façon que ce liquide occupe, dans la capacité JK, un volume supérieur à la moitié de cette capacité. Au-dessus de ce liquide, on introduit quelques décigrammes d'un liquide assez volatil pour que, dans l'intervalle des températures entre lesquelles doit fonctionner l'appareil, ce liquide puisse se réduire à l'état de VAPEUR SATURANTE ayant une tension notable, puis on ferme le système.

Le tube ou le faisceau de tubes qui constitue la petite capacité JK est la seule partie réellement sensible à la chaleur.

Sous l'action de cet agent, la tension de vapeur du

liquide volatil que contient cette capacité varie et détermine dans le gros tube *c a b*, par l'intermédiaire du liquide non volatil, des mouvements correspondants d'extension ou de contraction. Si l'on fixe l'extrémité *b* du gros tube, l'extrémité *c* restant libre, cette extrémité traduira, par ses mouvements, toutes les variations de température auxquelles sera soumise la capacité *J K*. Ce sont ces mouvements que nous allons utiliser dans la suite pour la mesure et la régulation de la température dans les divers cas de la pratique ; mais avant d'en décrire les applications, voyons ce que les appareils présentent de nouveau sur leurs devanciers.

Défectuosités des appareils existants

De l'amplitude des mouvements dont il vient d'être question dépend, pour des variations données de la température, la sensibilité des appareils.

Or, ces appareils reposent, comme on vient de le voir, sur la loi des variations des tensions de vapeur avec la température, tandis que les appareils similaires, employés jusqu'ici, reposent sur le phénomène de dilatation.

Examinons les conséquences pratiques de ces principes différents au point de vue qui nous occupe.

Les thermomètres ou thermo-régulateurs métalliques, basés sur la dilatation, ne peuvent pas donner de bons

résultats dans la pratique courante pour les raisons suivantes :

1° *Ils manquent de sensibilité.*

Pour mieux fixer les idées, considérons deux thermomètres de chaque système et supposons que l'enveloppe thermique soit réduite à un cylindre XY (fig. 2) de 10 centimètres carrés de section et de 20 centimètres de longueur dans lequel puisse se mouvoir un piston P dont le déplacement indiquera la température ; plaçons derrière ce piston une substance dilatable, par exemple du mercure dont le coefficient de dilatation est égal à $1/5550$. Il convient de remarquer que dans les thermo-

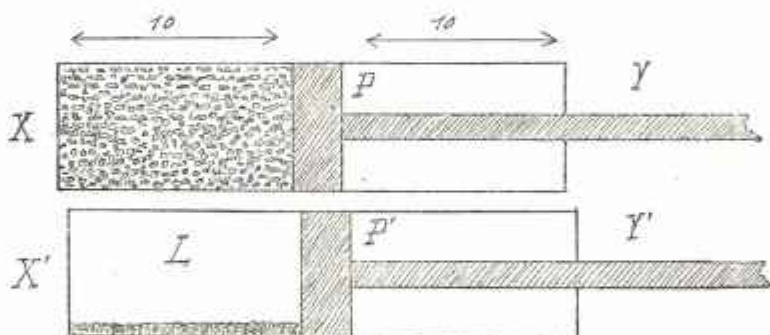


Fig 2 et 3.

mètres métalliques industriels à dilatation d'un fluide quelconque, ce fluide doit toujours *remplir entièrement* l'enceinte dans laquelle il est placé. Faisons augmenter de t_0 à $t_0 + 1$ degrés la température de ce système, le mercure va se dilater et, en faisant abstraction de la

dilatation de l'enveloppe du cylindre, son augmentation de volume évaluée en centimètres cubes sera de $100/5550$, soit $1/55$ de centimètre cube environ.

La section du cylindre étant de 10 centimètres carrés, cette augmentation de volume ne peut faire avancer le piston de plus de $1/5$ de millimètre lors même que ce piston et les organes que sa tige doit mouvoir n'offriraient aucune résistance au mouvement.

Considérons en second lieu le même dispositif dans lequel on a remplacé le mercure par un liquide L (fig. 3), capable d'émettre, à la température t_0 , des vapeurs saturantes de tension convenable, et supposons le piston en équilibre au même point de sa course que précédemment. Si nous portons ce système de la température t_0 à la température $t_0 + 1$ degrés, cette augmentation de température aura pour effet une augmentation de la tension de vapeur du liquide qui produira sur le piston une force constante capable de faire avancer indéfiniment le piston tant qu'il restera derrière celui-ci une parcelle du liquide. En particulier, si la résistance que la tige du piston a à vaincre est inférieure à l'augmentation de tension de vapeur correspondant à l'augmentation de température, le piston P' est poussé jusqu'au fond de son cylindre.

Dans les deux cas que nous venons de considérer : *les grandeurs des déplacements de pistons représentent les sensibilités respectives des deux systèmes comparés.*

Dans le système à dilatation, cette sensibilité est représentée par 1/5 de millimètre, tandis que dans l'autre, elle n'est limitée que par la longueur du cylindre.

Cette conclusion est d'ailleurs une conséquence directe d'un principe de physique bien connu, à savoir : *Que la tension d'une vapeur saturante est indépendante de l'espace qu'elle occupe.*

Il est bien évident que, dans la pratique, la résistance des organes à mouvoir atténue la sensibilité dans les deux cas.

2° *Les thermomètres et thermo-régulateurs métalliques industriels basés sur la dilatation manquent de précision.*

Supposons que, pour une cause quelconque, la portion du cylindre dans laquelle se trouve le mercure M vienne à être déformée légèrement et, toujours pour fixer les idées, supposons que cette déformation se traduise par une augmentation de capacité du cylindre. Si cette augmentation de capacité est supérieure à 1/55 de centimètre cube, le piston ne bouge plus quand on fait varier la température de t° à $t^{\circ} + 1$ degrés. La déformation de l'enceinte qui contient la substance dilatable peut ainsi faire varier le réglage de ces appareils de plusieurs degrés et rendre leurs indications tout à fait ridicules.

De fait, ces déformations et les dérèglages qui en sont la conséquence se produisent d'une façon permanente dans la pratique sous l'effet des pressions intérieures et

surtout de la dilatation brutale des solides et des liquides.

Dans notre appareil, ces déformations ne peuvent en rien influencer son réglage, puisque la tension d'une vapeur saturante est absolument indépendante du volume qu'elle occupe. La partie sensible de notre appareil peut donc être déformée, aplatie, tordue, sans autre inconvénient que le risque de percer l'enveloppe.

3° Dans les thermomètres et les thermo-régulateurs métalliques basés sur la dilatation d'un liquide ou d'un gaz, la moindre fuite en un point quelconque du système met rapidement les appareils hors d'usage.

Il est facile de voir qu'une fuite équivaut à une déformation entraînant une augmentation de capacité du système contenant la substance dilatable.

Considérons à nouveau le cylindre précédent, figure 2; supposons que le thermomètre ainsi simplifié doive fonctionner à des températures comprises entre 40 et 50 degrés et que la pression maximum nécessaire pour faire mouvoir les organes indicateurs soit de 20 kilogrammes. En nous reportant aux nombres précédents, nous voyons qu'une fuite de mercure de 10/55 de centimètre cube, soit de 1/5 de centimètre cube environ, non seulement dérègle l'appareil, mais encore le met complètement hors d'usage puisque, pour toutes les températures comprises entre 40 et 50 degrés, le piston ne pourra faire aucun mouvement.

Substituons au mercure un liquide à tension de vapeur convenable, de l'ammoniac anhydre par exemple, dont

1 gramme donne 1.350 centimètres cubes de gaz dans les conditions normales, il faudra seulement pour produire l'effort maximum considéré, soit 20 kilogrammes, *1 gramme et demi* d'ammoniac anhydre qui représente 2.025 centimètres cubes de gaz. S'il y a fuite, l'appareil se dérègle avec une extrême lenteur et avant qu'il soit hors d'usage entre 40 et 50 degrés, il faut qu'il se soit perdu 1.925 centimètres cubes de gaz au lieu de 1/5 de centimètre cube dans le cas du système à dilatation.

Ce qui veut dire que (si les fuites sont les mêmes dans les deux cas) il faudra, pour être hors d'usage, dix mille fois plus de temps au thermomètre à tension de vapeur qu'au thermomètre à dilatation.

4° Dans les thermomètres et thermo-régulateurs métalliques industriels fondés sur la dilatation des gaz et des liquides, il est nécessaire, si l'on veut avoir quelque sensibilité, de donner à l'enceinte qui renferme la substance dilatable des dimensions relativement énormes.

Comme nous l'avons démontré précédemment : Pour une variation de température donnée, c'est l'amplitude des mouvements communiqués aux organes mobiles qui fait la sensibilité de l'appareil ; or, cette amplitude ne peut être grande que si la variation de volume de la substance dilatable est elle-même considérable ; d'autre part, cette variation de volume est d'autant plus grande que le volume initial de la substance dilatable est plus considérable. On augmentera donc la sensibilité des thermomètres et des thermo-régulateurs métalliques à

dilatation, en donnant de grandes dimensions à l'enceinte qui contient cette substance.

Cette augmentation indispensable de la masse de substance dilatable entraîne dans la pratique de très graves inconvénients :

I. — L'appareil devient extrêmement paresseux, en ce sens qu'il lui faut un temps considérable pour se mettre en équilibre avec le milieu thermique : d'où retard dans la manœuvre des organes indicateurs enregistreurs ou régulateurs et, par suite, défaut de précision.

II. — Nombreuses chances de fuite par le fait de la multiplication des soudures sur l'enceinte contenant la substance dilatable.

III. — Encombrement considérable qui, en supposant qu'un thermomètre métallique à dilatation puisse donner le moindre résultat utile, donnerait à l'appareil un aspect peu gracieux.

Dans nos appareils, l'enceinte à tension de vapeur n'atteint pas les dimensions d'un thermomètre à mercure ordinaire et, comme cette enceinte est formée par un tube métallique à mince paroi, l'appareil se met aussi vite et même plus vite que le thermomètre en équilibre de température avec le milieu dont il doit indiquer ou régulariser la température.

C'est là une condition nécessaire de bon fonctionnement.

5° Dans les thermomètres et thermo-régulateurs métalliques à dilatation, toutes les parties de l'enceinte

contenant la substance dilatable participent à la dilatation.

Il est évident que la lecture faite sur ces instruments n'est que la résultante des diverses variations de volume provoquées par les variations de température, tant sur la substance dilatable que sur l'enveloppe qui renferme cette substance. L'emploi d'un tel thermomètre devient absolument ridicule, si chaque fois qu'on s'en sert l'enceinte qui contient la substance dilatable n'est pas plongée entièrement dans le milieu dont il s'agit d'évaluer la température, de façon que la variation thermique soit la même en tous les points de cette enceinte. Cette condition nécessaire entraîne de graves inconvénients : car, suivant la température, suivant la nature de ce milieu, les organes de l'instrument peuvent être déformés ou détériorés. De plus, dans beaucoup de cas, les dimensions du milieu peuvent être trop restreintes pour pouvoir y introduire l'appareil.

Tous ces inconvénients sont radicalement supprimés par l'emploi des thermomètres et thermo-régulateurs à tension de vapeur saturée.

En effet, *la seule partie de l'appareil qui doit être introduite dans l'enceinte à chauffer est le cylindre que porte l'extrémité du tube flexible, cylindre qui, dans les applications qui viennent d'être signalées, se réduit à un petit tube métallique ayant 6 centimètres de longueur sur 6 millimètres de diamètre extérieur. Les variations de température le long du tube flexible ou sur*

toutes les autres parties de l'appareil n'ont aucune influence sur ces indications.

Thermomètres et thermo-régulateurs métalliques fondés sur la dilatation des solides

Ces instruments sont certainement plus défectueux encore que ceux basés sur la dilatation d'un fluide; car, aux inconvénients signalés précédemment viennent s'ajouter les déformations permanentes du solide, déformations qui résultent des variations de température auxquelles a été soumis l'appareil.

En résumé, nous venons de démontrer que les thermomètres et thermo-régulateurs métalliques existants, fondés sur la dilatation, ne peuvent avoir ni la sensibilité ni la précision nécessaires dans la plus grossière pratique;

Que ces appareils sont sujets à un dérèglement dont les causes énoncées ci-dessus sont permanentes;

Que, par leur encombrement, par leur complication, ils sont exclus du plus grand nombre des applications où ces appareils s'imposent;

Qu'il est absolument impossible de les appliquer dans les cas extrêmement intéressants dans la pratique, de l'évaluation et de la régulation de la température à distance.

Nous avons également montré dans la comparaison qui précède que nos appareils, basés sur la loi des ten-

sions de vapeurs saturées, ne possèdent aucun de ces graves défauts. En concluant, nous ne nous défendrons donc pas de prétendre que, vis-à-vis de ces appareils nouveaux, les rares thermomètres et thermo-régulateurs métalliques existants ne sont que des concurrents tout à fait négligeables.

Emploi du thermomètre à tension de vapeur saturée comme thermomètre de haute précision dans les laboratoires, dans les observatoires, etc. Comparaison de cet appareil avec les thermomètres à air et à mercure employés dans les recherches scientifiques

Nous venons de voir l'appareil dans ses applications industrielles, examinons maintenant ses applications au point de vue purement scientifique.

Tout physicien de laboratoire sait que, parmi toutes les méthodes qui permettent d'arriver à un but déterminé, la meilleure est celle qui présente le minimum de corrections sur les indications fournies par les appareils employés au cours du travail proposé. Celui-là sait aussi que, parmi les multiples appareils employés dans les recherches scientifiques, la catégorie d'instruments qu'on appelle thermomètres ou thermoscopes : *thermomètre à air, dénommé aussi thermomètre normal, thermomètre à mercure à tige de verre*, est celle dont l'emploi exige les corrections les plus nombreuses, les plus longues et par suite les plus incertaines.

Pour nous faire une très légère idée de ces corrections, résumons les principales opérations que doit subir la lecture d'un thermomètre à mercure avant de pouvoir être considérée comme une mesure précise.

Par définition, on convient qu'entre les deux points fixes (généralement le point 0° C., 0° R., 32° F. correspond à la température de la glace fondante ; le point 100° C., 80° R., 212° F. à la température d'ébullition de l'eau sous les conditions normales de pression), le coefficient de dilatation du mercure est constant. On sait que, pour déterminer ces points, le thermomètre (réservoir et tige) est entièrement immergé dans les milieux donnant la température des points fixes. L'intervalle, mesuré sur la tige et compris entre les deux points fixes, est divisé en 100, en 80 ou en 180 parties d'égale longueur suivant l'échelle adoptée. Or, quand il s'agit d'un thermomètre devant servir à des mesures de précision, il n'est pas permis de considérer le canal percé dans la tige comme rigoureusement cylindrique ; car, de fait, il ne l'est jamais. Il est donc nécessaire de mesurer expérimentalement la capacité du canal intérieur comprise entre deux divisions consécutives quelconques et cela chaque fois qu'on se sert de l'instrument. Cette opération, qu'on désigne sous le nom de *calibrage du thermomètre*, est extrêmement délicate, et si précis que soient les procédés employés, quelle que soit l'habileté de l'opérateur, si l'on tient compte de la petitesse de la quantité à mesurer, on sera convaincu que les erreurs possibles sont relativement considérables.

Déplacement du zéro dans les thermomètres de préci-

sion. — On sait que, sous l'influence de la chaleur, le verre subit des déformations qui entraînent toujours une variation assez considérable dans la capacité, soit du réservoir, soit du canal de la tige du thermomètre. Ces déformations sont fonction du temps et des états antérieurs par lesquels a passé l'instrument ; elles ne sont d'ailleurs régies par aucune loi et l'erreur qui en résulte peut atteindre 2 degrés C.

Correction d'intervalle fondamental. — Puisque la chaleur a pour effet de faire varier d'une façon continue la capacité intérieure d'un thermomètre, la capacité comprise entre les deux points fixes varie également de sorte que toute lecture faite sur le thermomètre est entachée de cette erreur, d'où correction désignée généralement sous le nom de *correction d'intervalle fondamental*.

Corrections de pression extérieure. — On conçoit que l'effort permanent que la pression atmosphérique exerce sur toute la surface extérieure d'un thermomètre à mercure puisse faire varier sa capacité intérieure d'autant que le vide existe généralement dans la partie de la tige non occupée par le mercure. Cette variation de la capacité intérieure affecte évidemment les lectures et, de ce fait, il est encore nécessaire de corriger *toutes les mesures* faites avec l'instrument. Cette correction, extrêmement laborieuse, exige plus de quarante observations successives.

Corrections de pression intérieure. — Quand un thermomètre est observé dans la position verticale, les parois du réservoir et de la tige subissent, par le fait de la pesanteur du mercure, des pressions dirigées de l'intérieur à l'extérieur,

ces pressions ont pour effet une augmentation de la capacité intérieure du système, d'où nouvelles corrections.

Corrections provenant de ce que la tige du thermomètre ne peut pas toujours être immergée dans le milieu dont il s'agit d'évaluer la température. — Nous avons vu précédemment que, lors de la détermination des points fixes, le thermomètre tout entier (réservoir et tige) est complètement immergé dans les milieux dont la température détermine ces points fixes. Pour se servir de ce thermomètre avec toute la précision désirable, il faudrait, chaque fois qu'on s'en sert, se placer dans les mêmes conditions que le constructeur, c'est-à-dire immerger complètement le thermomètre dans le milieu dont on veut évaluer la température. Or, dans la généralité des cas, il est complètement impossible de réaliser ces conditions et, cependant, le réservoir du thermomètre et sa tige se trouvent à des températures souvent fort différentes, de sorte que, pour l'expérimentateur consciencieux, la seule chance de salut est encore d'avoir recours aux fameuses corrections avec tout leur cortège d'incertitudes.

Les quelques corrections que nous venons de signaler ne constituent pas les seules critiques que l'on puisse adresser au thermomètre à mercure de précision. Les personnes qui désireraient avoir une idée exacte du nombre invraisemblable de corrections que doit subir chaque lecture de cet instrument peuvent consulter le Mémoire de M. Ch. Guillaume, du Bureau International des poids et mesures, ou les *Thermometrische Arbeiten betreffend die Herstellung und*

Untersuchung der Quecksilber-Normalthermometer du professeur J. Pernet.

D'ailleurs, deux thermomètres à mercure ne se suivent jamais d'une façon rigoureuse dans l'étendue de l'échelle thermométrique comprise entre les deux points fixes ; en d'autres termes, ils ne sont jamais comparables. La grandeur de discordance dépend, non seulement de la matière dont est formée l'enveloppe thermométrique, mais aussi de la façon dont cette enveloppe a été travaillée.

Thermomètre à air dit thermomètre normal.— Cet instrument destiné à corriger ou à atténuer les défauts du précédent n'est lui-même pas exempt de défauts.

On sait que ce thermomètre se réduit, à quelques perfectionnements près, à l'appareil employé par Regnault pour la détermination des coefficients de dilatation à volume constant des divers gaz.

Trois raisons principales ont motivé son choix, ce sont :

1° Que le coefficient moyen de dilatation des gaz est indépendant de la pression ;

2° Que le coefficient de la dilatation de l'air est beaucoup plus considérable que celui du mercure ;

3° Que les thermomètres à gaz sont comparables entre eux.

Or, sur ces trois propositions qui servent de pierre fondamentale au thermomètre à air, la première et la troisième sont inexactes au su de tous les physiciens.

De plus dans l'équation fournie par l'observation de l'appareil et qui sert à calculer la température, il existe des coefficients dont la valeur est toujours incertaine.

En outre, pendant les mesures, non seulement la masse d'air chauffé n'est pas à une température uniforme, mais elle communique avec le manomètre au moyen de raccords qui peuvent fuir ou être déformés, cette déformation provoquant une variation du volume intérieur.

Enfin, le réservoir qui contient le gaz et qui est chauffé à des températures différentes, ainsi que la tige qui fait communiquer le réservoir avec le manomètre, subissent des variations de température qui, à chaque mesure, font varier leur volume intérieur.

Sans insister davantage, on voit que la mesure de la température au moyen du thermomètre à air n'exige guère moins de corrections incertaines que les lectures fournies par le thermomètre à mercure.

Emploi du thermomètre à tension de vapeur saturée comme thermomètre de précision

Cet appareil est basé sur le principe suivant déjà énoncé précédemment, à savoir :

Que la tension d'une vapeur saturée est fonction seulement de sa température et est indépendante du volume qu'elle occupe.

Voilà un principe qui a, au moins, le mérite de n'être contesté par personne, tandis qu'il n'en est pas de même des propositions fondamentales sur lesquelles reposent les thermomètres à dilatation, propositions qui toutes ont été reconnues inexactes.

Examinons les deux sortes de thermomètres, à dilatation et à tension de vapeur saturée au point de vue du nombre de corrections que leurs lectures doivent subir. Les principales corrections pour les thermomètres à dilatation sont les suivantes : *Correction de calibrage. Correction d'intervalle fondamental. Correction de pression extérieure. Correction de pression intérieure.*

Ces quatre corrections extrêmement fastidieuses disparaissent radicalement par l'emploi du thermomètre à tension de vapeur saturée; c'est une conséquence évidente du principe énoncé ci-dessus puisque toutes ces corrections sont motivées par une variation de capacité intérieure du thermomètre et que la tension d'une vapeur saturée est rigoureusement indépendante de ces variations de volume.

Il est donc bien entendu que les variations de capacité, principales causes des innombrables corrections que doivent subir les lectures des thermomètres à dilatation, n'ont aucune influence sur les indications d'un thermomètre à tension de vapeur saturée.

Le déplacement du zéro de ce dernier instrument ne peut donc pas être attribuable aux causes qui produisent le déplacement du zéro du thermomètre à dilatation : ce déplacement ne peut se produire que sous l'influence d'une modification de l'élasticité du métal dont est formé le tube moteur, c'est-à-dire de l'acier ou bien encore par suite des déformations des organes qui actionnent l'aiguille indicatrice.

Quelles sont les causes qui peuvent faire varier cette élasticité ou provoquer ces déformations ?

La principale de ces causes réside dans les grandes variations de température auxquelles les pièces métalliques peuvent être soumises, c'est la raison pour laquelle les thermomètres métalliques à dilatation n'ont jamais pu fournir un résultat acceptable.

Cette cause n'existe pas dans l'appareil que nous proposons, puisqu'il est disposé de façon que le tube moteur n'est *jamais chauffé et ne subit que les variations de la température atmosphérique ambiante*, le réservoir qui termine l'extrémité du petit tube flexible devant seul être plongé dans le milieu dont on veut évaluer la température.

En second lieu, on peut craindre que les mouvements d'extension ou de contraction du tube moteur provoquent une altération dans son élasticité. Effectivement, on constate cette altération quand on opère avec un tube n'ayant jamais servi ; mais si, avant de graduer l'instrument, on a soin de faire travailler ce tube pendant un temps convenable et à une température notablement supérieure à la température la plus élevée qu'il doive indiquer en activité de service, on ne constate plus aucune altération sensible dans l'élasticité du tube (observations d'une durée de cinq mois sur l'enregistreur décrit ci-après).

La lecture d'une température faite sur le thermomètre à tension de vapeur saturée ne comportera, dans la généralité des cas, que deux corrections faciles à effectuer :

1^o L'erreur de lecture provenant des variations de la pression atmosphérique, variations qui ont pour effet de faire

fermer ou ouvrir le tube moteur suivant qu'elles sont positives ou négatives.

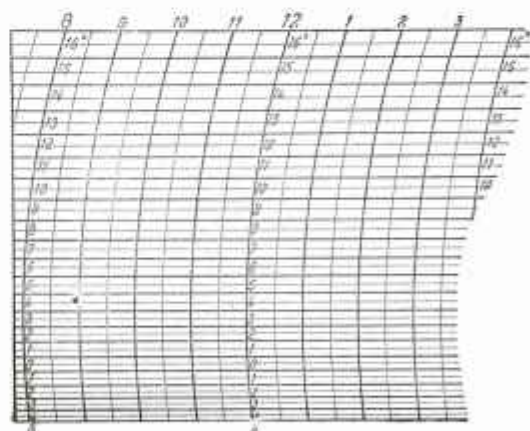
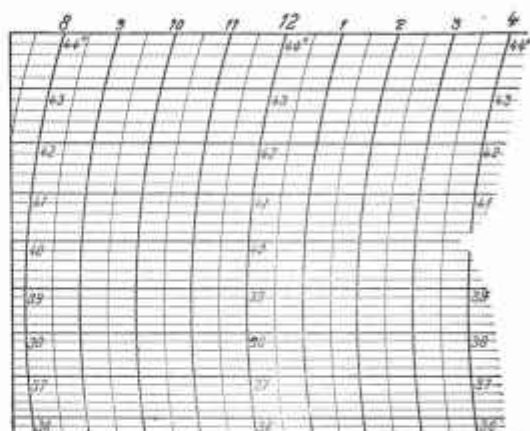
2° L'erreur de lecture, également positive ou négative, provenant de la pression qu'exerce à l'intérieur du tube moteur la colonne liquide contenue dans le tube flexible suivant la position du niveau liquide dans le réservoir sensible par rapport au plan horizontal contenant ce niveau pendant la graduation de l'appareil ou par rapport à tout autre plan de repère déterminé.

Ces deux corrections se réduisent à l'observation du baromètre et à la mesure d'une différence de niveau ; les appareils sont d'ailleurs disposés de façon à obtenir rapidement la lecture corrigée de ces deux erreurs.

Comparabilité des thermomètres à tension de vapeur saturée. — S'il est vrai que la loi des tensions de vapeur saturée énoncée ci-dessus est rigoureusement exacte, deux thermomètres à tension de vapeur saturée doivent être comparables entre eux, car la non-comparabilité des thermomètres à dilatation provient surtout de ce que les propositions fondamentales qui leur servent de base ne sont pas rigoureusement exactes.

Sensibilité des thermomètres à tension de vapeur saturée. — On a vu qu'une des principales raisons du choix du thermomètre à air comme thermomètre étalon est la grande dilatabilité de l'air par rapport à celle du mercure. Or, si l'on veut bien se rapporter à ce qui a été dit, au commencement de cette notice, sur la sensibilité relative des thermomètres à dilatation et des thermomètres à tension de vapeur satu-

rée, on se convaincra que la sensibilité d'un thermomètre à tension de vapeur saturée est incomparablement plus grande que celle d'un thermomètre à gaz dont la sensibilité diminue d'ailleurs avec la température, tandis que celle du thermomètre à tension de vapeur saturée augmente rapidement dans les mêmes conditions.



Ainsi, en examinant les deux graphiques représentés en vraie grandeur (fig. 4 et 5) (tels qu'ils résultent de la graduation par comparaison du thermomètre enregistreur décrit ci-après), on voit que l'intervalle correspondant à un degré est sensiblement cinq fois plus grand à 44 degrés qu'à 5 degrés au-dessous de zéro.

Disposition pratique des thermomètres à tension de vapeur saturée

Les mouvements de l'organe qui a été décrit au commencement de cette notice peuvent être traduits pratiquement sur un cadran, comme l'indique la figure 6, ou sur un cylindre tournant *o* figure 7. Dans le premier cas, on a un thermomètre ou un pyromètre à cadran et, dans le second, un thermomètre ou un pyromètre enregistreur.

Thermomètres et pyromètres à cadran. — Dans l'appareil à cadran, représenté par la figure 6, l'extrémité du tube moteur *a* est fixée d'une façon invariable sur le fond non déformable d'une boîte métallique, tandis que les mouvements de l'extrémité libre sont transmis par une bielle *p* à un levier *q*, monté sur un pivot fixe et dont le grand bras, de longueur réglable, porte un secteur-denté *s*, qui engrène avec un pignon *t*, solidaire de l'aiguille *u*.

La pièce sur laquelle sont montés le pivot de l'aiguille et le secteur est fixée invariablement sur le même fond

que l'extrémité fixe *e* du tube moteur, afin d'éviter tout déplacement relatif de ces pièces.

Le tube flexible *eds* qui peut avoir la longueur que l'on désire : 10, 50, 100 mètres, etc., traverse le côté latéral de la boîte. Dans le cas de la figure 6, il se termine par une ampoule *s* ayant la grosseur et la forme d'un œuf de petit oiseau. Cette ampoule est la seule

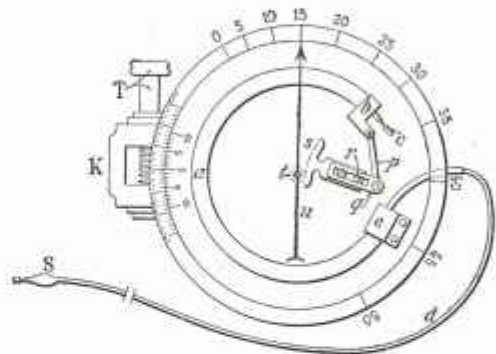


Fig. 6.

partie du système qui soit pratiquement sensible à la chaleur. L'aiguille de l'appareil ne fait qu'un léger mouvement, puis revient rigoureusement à sa position primitive, quand, après avoir préalablement enroulé le tube flexible en un faisceau de spirales, on le plonge tout entier dans un bain, ayant une température comprise entre les deux limites extrêmes de température entre lesquelles doit fonctionner l'appareil, l'ampoule restant, dans cette expérience, à température constante.

L'aiguille ne se met en marche que si cette ampoule est elle-même plongée dans le bain. On conçoit dès lors que l'on puisse, sans sortir du coin du feu, lire et enregistrer, si on le désire, la température qui existe au fond de son jardin, quelque profond qu'il soit.

Graduation. — La graduation de l'appareil paraît très pénible parce que les divisions ne sont pas équidistantes. Elle devient cependant tout à fait simple et absolument rigoureuse si l'on a à sa disposition un bon thermo-régulateur capable de maintenir, à une température constante, une grande masse de liquide.

C'est ainsi qu'avec un modèle particulièrement soigné du thermo-régulateur de notre système, basé sur le même principe que les thermomètres qui nous occupent et assurant la constance de la température à $1/20$ de degré près, nous avons pu facilement graduer ces appareils, par comparaison avec un thermomètre étalon, non seulement de degré en degré, mais de $1/5$ en $1/5$ de degré.

Cette graduation ainsi effectuée sur un cadran de dimensions données et pour un intervalle de température déterminé, permet la graduation rapide, sans interpolation, d'un thermomètre dont le cadran a des dimensions quelconques, lors même que le tube moteur ne posséderait pas le même coefficient d'élasticité que son étalon. Si, en effet, on considère que l'élongation de l'extrémité libre du tube est proportionnelle à la pression, on voit qu'il suffira de déterminer expérimentalement deux points, les points 0° et 25 degrés par

exemple sur le nouveau cadran, puis, avec un rayon correspondant à l'arc de cercle qui passe par ces deux points, de décrire un cercle ayant pour centre le centre de rotation t de l'aiguille de l'étalon figure 6. L'arc de ce cercle, compris entre les rayons $t o'$, $t, 25$ degrés représentera l'intervalle de température 0° - 25 degrés relatif au nouveau cadran. Il suffira ensuite de joindre au centre t les divisions intermédiaires de l'étalon ; les intersections de ces rayons avec l'arc de cercle précédent représenteront les divisions intermédiaires du cadran à graduer.

Emploi de l'appareil dans les recherches scientifiques. — Le degré de précision que l'on demande dans l'industrie n'exige pas, en général, les deux corrections dont il a été question précédemment, mais il est nécessaire de les faire quand l'instrument est employé comme thermomètre de précision.

Qu'il s'agisse de corriger les effets de pression provenant de la différence de niveau existant entre le niveau du liquide dans l'ampoule et le plan de repère dont nous avons parlé, ces corrections sont faites d'après le même principe, à savoir : *que les elongations de l'extrémité libre du tube moteur sont proportionnelles aux pressions* (il n'y a qu'à examiner la graduation d'un bon manomètre métallique pour avoir une idée de l'exactitude de ce principe).

En conséquence, l'ampoule sensible étant maintenue à une température invariable, il suffira :

1^o De déterminer le déplacement ε de l'aiguille correspondant à une différence de niveau de 1 mètre par exemple : si d désigne la densité du liquide dans le tube moteur et dans

le tube flexible dans les conditions de l'expérience, la pression par centimètre carré évaluée en grammes, que la colonne liquide de 1 mètre exerce sur les parois du tube moteur, est égale à $100 d$ et le déplacement de l'aiguille, correspondant à 1 gramme, égal à $\frac{\varepsilon}{100 d}$.

2° L'appareil étant placé dans une boîte étanche et l'ampoule s toujours maintenue à une température variable, de faire varier la pression dans cette boîte de 10 centimètres de mercure par exemple ; si ε' représente le déplacement correspondant de l'aiguille, le déplacement correspondant à une variation de 1 gramme dans la pression atmosphérique sera $\frac{\varepsilon'}{10 \times d'}$, d' représentant la densité du mercure corrigée suivant les conditions de l'expérience.

Les expressions : $\frac{\varepsilon}{100 d}$ et $\frac{\varepsilon'}{10 d'}$ sont deux constantes de l'appareil qui doivent être déterminées par le constructeur et inscrites sur l'instrument.

Pour fixer les idées, supposons qu'au moment d'une lecture faite sur l'instrument, la différence de niveau soit équivalente à une pression de n grammes et que la variation de la pression atmosphérique par rapport à sa valeur normale soit de n' grammes, le déplacement que devra subir l'aiguille sera donné en grandeur et en signe par l'expression :

$$\frac{n\varepsilon}{100 d} + \frac{n'\varepsilon'}{10 d'}$$

Au lieu de déplacer l'aiguille de la quantité numérique indiquée par cette expression, c'est le cadran que l'on fait tourner dans le sens convenable de la même quantité de façon à ramener sous la pointe de l'aiguille la division du cadran qui correspond à la lecture exacte.

A cet effet, le limbe qui porte les divisions thermiques est muni d'un vernier qui se déplace, quand on fait tourner le cadran, en regard d'une seconde graduation pratiquée sur un disque métallique fixé invariablement sur le fond de la boîte de l'instrument.

La rotation du limbe s'obtient au moyen d'une vis tangente T dont la chape K est fixée invariablement à la pièce qui supporte le tube moteur. Sachant à quelle pression correspond l'intervalle de deux traits consécutifs de la division, il sera facile d'obtenir la température corrigée. Dans le thermomètre enregistreur décrit ci-après (fig. 7) la correction se fait de la même manière. Sur le cylindre O, actionné par le mouvement d'horlogerie, peut glisser longitudinalement un autre cylindre O', muni à sa partie supérieure d'une pièce MN que traverse une vis W dont l'extrémité inférieure peut tourner dans un collier qui ne lui permet aucun mouvement longitudinal. Une graduation GH munie d'un vernier R permet d'amener, par rotation de la vis W, la division corrigée sous la pointe du style inscripteur.

En profitant de la particularité que présente l'appareil d'indiquer ou d'enregistrer la température à distance, on peut, dans les mesures de précision, éviter pour ainsi dire toutes

corrections et principalement les corrections dues aux variations de la pression et de la température extérieure.

Pour cela, on place l'appareil dans une boîte dont l'une des faces porte une glace en verre permettant les lectures. On fixe cette boîte dans un bain d'eau chauffée au gaz à l'aide d'un thermo-régulateur à tension de vapeur saturée qui maintient sa température constante à moins de $1/15$ de degré près (cette température étant celle de la graduation de l'appareil), puis, au moyen d'une petite provision d'air comprimé que l'on obtient soi-même avec une pompe à main et d'un régulateur de pression, on maintient la pression constante et égale à la pression de graduation dans la boîte

à $\frac{1}{10000}$ près de sa valeur.

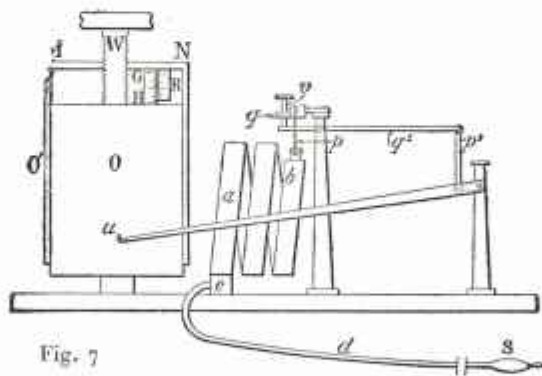


Fig. 7

Thermomètre et pyromètre enregistreur à tension de vapeur saturée. — Dans cet appareil (fig. 7), le tube moteur *a* peut comporter plusieurs spires comme l'in-

dique la figure, les déplacements de son extrémité libre b sont transmis au stylet inscripteur a par l'intermédiaire d'une bielle p , d'un levier q (vu par bout), d'un autre levier q' et d'une autre bielle p' . Un mouvement d'horlogerie placé à l'intérieur du cylindre O et non visible sur la figure assure la rotation uniforme du système de cylindre O et O' . Sur la surface latérale du cylindre O , on enroule le graphique préalablement gradué dans l'intervalle des températures que l'on désire mesurer.

Les figures 4 et 8 représentent, aux $5/8$ de leur grandeur, deux graphiques (l'un de -5 à $+16$ degrés, l'autre de 36 à 44 degrés) se rapportant à ce modèle d'appareils. Dans ces graphiques, les traits rectilignes et horizontaux représentent les degrés et fractions de degré, tandis que les intervalles compris entre les arcs de cercle dirigés dans le sens vertical représentent les heures et fractions d'heures : ce sont les courbes horaires. L'intersection de ces deux groupes de lignes avec la courbe tracée par le stylet permettra donc de connaître, à loisir, la température à un instant quelconque de la journée ou de la nuit. De plus, si l'on remarque, comme on l'a fait pour le thermomètre à cadran décrit ci-dessus, que le tube flexible $ed S$ peut avoir une longueur illimitée, on pourra, tout en laissant le corps de l'appareil sur sa cheminée, enregistrer la température à 100, 500, 1000 mètres, etc., de distance.

L'examen des graphiques (fig. 4 et 5) montre l'extrême et presque invraisemblable sensibilité du système. L'intervalle 36-44 degrés mesure plus de 80 millimètres de hauteur, lors même que l'appareil auquel se rapportent ces graphiques a les dimensions d'un petit manomètre enregistreur.

Ces graphiques montrent, en outre, que la sensibilité augmente rapidement avec la température puisque l'intervalle 43-44 degrés est environ cinq fois plus grand que l'intervalle 5-4 degrés au-dessous de zéro.

Sans qu'il soit nécessaire de changer les dimensions de ses organes, le modèle qui nous occupe peut enregistrer la température depuis 30 degrés au-dessous de zéro jusqu'à + 60 degrés, c'est-à-dire dans un intervalle de 90 degrés. Le cylindre qui permettrait d'inscrire ces températures en utilisant toute la sensibilité de l'instrument devrait avoir 58 centimètres de hauteur. Au lieu d'avoir un cylindre si long, il est préférable, tout en respectant la sensibilité du système, d'employer un petit cylindre de façon que les graphiques, gradués dans les limites des températures qui intéressent, aient de 0 à 10 ou à 20 centimètres de hauteur.

La vis de réglage v (fig. 7) permet au constructeur muni d'un thermomètre étalon et du thermo-régulateur de notre système de régler une fois pour toutes les indications du style inscripteur.

L'intervalle de température dont nous venons de parler, pour donner un exemple de la sensibilité de l'ap-

pareil, pourrait faire supposer que cet instrument ne s'applique qu'à la mesure des basses et moyennes températures.

Les limites de fonctionnement ne sont fixées que par la température de fusion de la matière dont est formé le réservoir sensible.

Disposition pratique des thermo-régulateurs à tension de vapeur saturée

Trois modèles d'appareils suffisent pour répondre à tous les besoins de la pratique.

Le dispositif, représenté par les figures 8 et 9, est celui qui convient dans le cas où l'agent calorifique employé est un fluide sous pression notable tel que la vapeur d'eau.

Une des extrémités du tube moteur est fixée sur le fond d'une boîte *i* venue de fonte, comme l'indique la figure 8. Cette boîte est mise en relation avec deux canaux J et K pouvant se raccorder avec la tuyauterie dans laquelle circule le fluide au moyen des brides qui les terminent.

Cette boîte est percée d'un orifice *m* débouchant dans la tubulure J. Dans cet orifice est engagée une tige *n* munie à l'une de ses extrémités d'un clapet *o* s'appliquant contre un siège en biseau *p*. L'autre extrémité de la tige *n* fait corps avec une rotule *q* serrée par un

écrou *v* contre une rondelle *s* fixée à une membrane *t*;

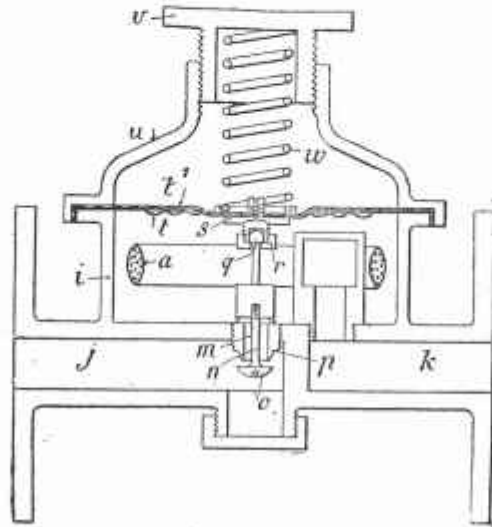


Fig. 8

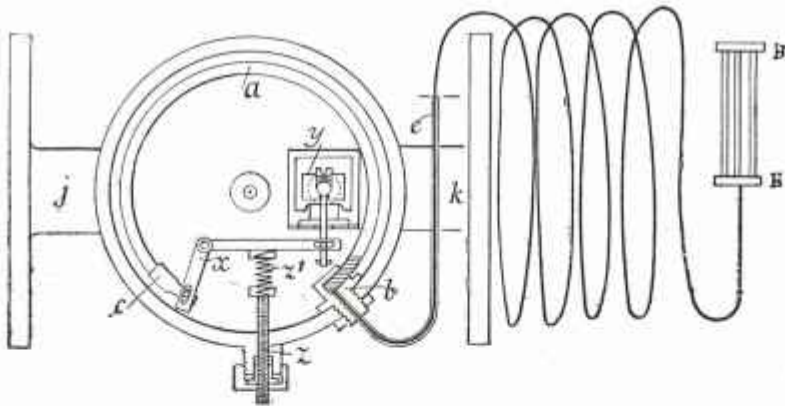


Fig. 9

cette articulation à rotule permet à l'obturateur *o* de

s'appliquer toujours exactement sur son siège p .

La membrane ondulée t forme le fond supérieur de la boîte i . Pour empêcher la déformation ou la rupture de cette membrane, on peut appliquer sur sa face supérieure une toile métallique t' qui lui est concentrique et dont les bords sont serrés, avec ceux de la membrane, entre les brides de la boîte i et de son couvercle u . Dans le col de ce couvercle est vissée une molette v dite molette de compensation.

L'extrémité c du tube courbé a (fig. 9) agit sur un levier x dont l'un des bras commande une seconde soupape y permettant l'écoulement du fluide de la boîte i dans la tubulure k et, de là, dans la tuyauterie de chauffage. Le tube c , aussi long qu'on le désire, traverse la boîte du régulateur, son extrémité qui constitue la partie sensible de l'appareil venant se placer dans l'enceinte où l'on veut maintenir la température constante.

Un excentrique de réglage non visible sur le dessin permet de faire pivoter autour de son axe la pièce sur laquelle est tourillonné le levier commandant la soupape y .

De cette façon, on peut, par la manœuvre de cet excentrique au moyen de la molette extérieure qui le commande, rapprocher ou éloigner le petit bras de levier de la butée et par suite fixer à un degré voulu la température que l'appareil doit maintenir constante. Une aiguille indicatrice mobile, soit sur le fond de l'ap-

pareil soit sur un limbe *ad hoc*, permet de repérer les températures intéressantes.

Il est facile de se rendre compte du fonctionnement de l'appareil.

La vapeur arrivant par l'une des tubulures J ou K, mais préférablement par la tubulure J, passe dans la boîte du régulateur sous une pression en rapport avec la tension du ressort W, puis s'écoule dans la tuyauterie de chauffage par la soupape γ . Tant que la température dans l'enceinte ou dans l'appartement à chauffer n'a pas atteint la valeur qu'on lui a assignée, cette soupape reste ouverte, mais elle se ferme dès que cette température est atteinte.

La fermeture de la soupape γ provoquant dans la boîte une augmentation de pression, le clapet σ se ferme aussitôt et intercepte l'arrivée de la vapeur. Un léger abaissement de la température dans l'enceinte ou dans l'appartement à chauffer fait ouvrir à nouveau la soupape γ et par suite le clapet σ et l'écoulement de vapeur dans les radiateurs de chauffage recommence et ainsi de suite.

Il est essentiel de remarquer qu'indépendamment des avantages démontrés ci-dessus et découlant directement de l'application du principe des vapeurs saturées, le dispositif qui vient d'être décrit supprime un défaut extrêmement grave qui, à lui seul, suffirait pour empêcher toute précision dans la régulation de la tem-

pérature quand il s'agit du chauffage par un fluide sous pression, comme la vapeur d'eau.

Ce défaut provient des *poussées variables* que la pression de la vapeur exerce, *suivant leur degré de fermeture*, sur les clapets qui commandent l'écoulement de la vapeur. L'homme du métier, tant soit peu observateur, a certainement remarqué les inconvénients de ce défaut mais il ne semble pas, jusqu'ici du moins, s'en être expliqué exactement la cause ; car ce défaut est commun à tous les appareils existants.

Dans l'appareil qui vient d'être décrit, il est facile de voir que les forces que la pression de la vapeur développe sur les clapets sont rendues sensiblement constantes et que les graves conséquences pratiques du défaut signalé sont annihilées.

DEUXIÈME MODÈLE

Pour le chauffage au moyen des fluides à très faible pression.

Ce modèle, principalement destiné au chauffage d'une enceinte quelconque ou d'un appartement au moyen d'un fluide sous faible pression comme le gaz ordinaire d'éclairage, l'acétylène, etc., est une réduction de l'appareil précédent dans lequel on aurait remplacé la membrane par un fond rigide. Sa disposition intérieure est d'ailleurs conforme au dispositif indiqué par la coupe représentée par la figure 9.

Ce modèle est représenté en activité de service dans une de ses nombreuses applications par la figure 11.

TROISIÈME MODÈLE

Pour le réglage de la température dans les appartements et autres milieux chauffés par l'air chaud ou par des fourneaux alimentés par la houille, le coke, le pétrole, l'alcool, le bois, etc.

Applicable également à la régulation du tirage d'une cheminée quelconque.

Ce modèle peu compliqué est représenté par la figure 10, actionnant la valve *h* d'une cheminée H. Pour amplifier les mouvements de l'extrémité libre du tube, on fait généralement agir cette extrémité libre sur un système multiplicateur formé soit par un ou plusieurs leviers, soit par un jeu de pignons.

Applications des appareils précédents

Les applications des appareils que nous venons de décrire sont très nombreuses, aussi n'est-il pas possible de les signaler toutes dans le cadre d'une notice.

On doit donc se borner à en citer quelques-unes à titre d'exemple.

PREMIER MODÈLE

Les principales applications de ce modèle sont : *Le chauffage par la vapeur d'eau ou par tout autre fluide sous une pression quelconque : des appartements, des*

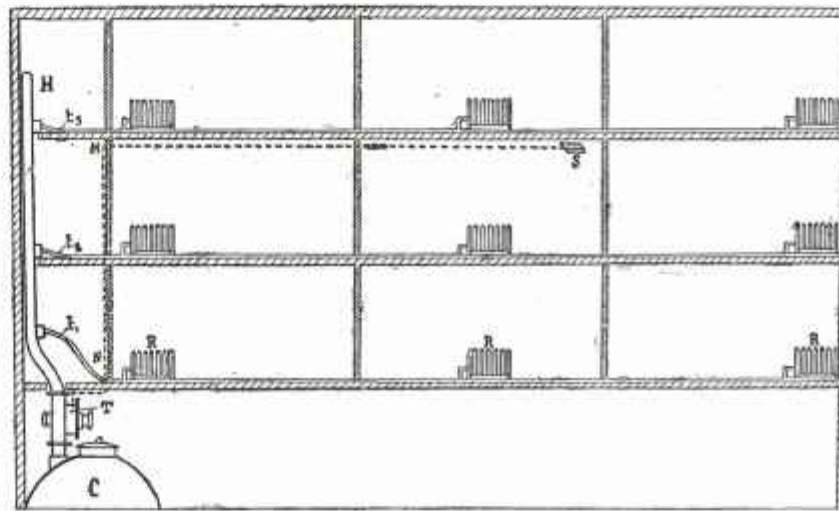


Fig. 10

serres, des salles de séchage de divers tissus et autres objets, des étuves à basse ou haute température employées dans de nombreuses industries telles que l'industrie de l'imperméabilisation des tissus, de la vulcanisation, etc., des voitures de chemins de fer. Maintien de la constance

de la température dans les caves de brasseries par vaporisation de gaz liquéfiés tels que l'acide carbonique liquide, l'ammoniac, l'acide sulfureux, etc.

On sait que le chauffage à la vapeur se réduit, dans ses éléments essentiels, à une chaudière dite à basse pression produisant la vapeur à une pression généralement compris entre 300 grammes et 2 kilogrammes, à un système de tuyauterie chargé du retour de l'eau condensée à la chaudière et amenant la vapeur soit dans un faisceau tubulaire, soit dans un cylindre à ailettes ou dans une caisse présentant une grande surface de rayonnement, ce dernier élément étant généralement désigné sous le nom de radiateur.

La chaudière C (fig. 10) est, en général, placée dans le sous-sol de l'appartement à chauffer. La vapeur qu'elle produit passe dans un gros tuyau TH et est distribuée à chaque étage par un ou plusieurs tubes tels que t^1 , t^2 , t^3 , venant se raccorder à la conduite principale TH. Chacun de ces tubes t^1 , t^2 , t^3 , conduit la vapeur aux divers radiateurs R qui, par rayonnement, doivent chauffer les appartements de la maison.

Pour rendre constante la température fournie par ce système, on peut employer, suivant la précision que l'on désire, un seul ou plusieurs thermo-régulateurs. La figure 6 représente le schéma d'une installation pour la régulation de la température de toute une maison par un seul thermo-régulateur.

Dans ce cas, ce dernier appareil T doit être placé sur

la conduite principale entre la chaudière C et le premier branchement t' , le tube flexible TNMS du thermo-régulateur (représenté en pointillé sur la fig. 10) fixé sur le mur de la pièce, à l'instar d'un fil électrique, vient aboutir en un point central des appartements où la partie sensible S du thermo-régulateur est fixée. Remarquons d'ailleurs que cette partie sensible ainsi que son tube de commande SMNT sont d'un encombrement minuscule puisque le faisceau sensible S ne se compose que de cinq tubes métalliques de 30 centimètres de long et de 6 millimètres de diamètre extérieur et que le tube de commande SMNT n'a que 4 millimètres de diamètre extérieur dans ses plus grandes dimensions.

L'installation dont nous venons de parler et qui ne comporte qu'un seul thermo-régulateur peut être suffisante dans bien des cas de la pratique courante ; par exemple, dans le cas d'un atelier, d'un magasin, d'une usine, cas où les étages ne forment généralement qu'une seule pièce ou plusieurs pièces en communication entre elles ; mais, dans le cas où toutes les pièces sont indépendantes, cette installation peut présenter quelques inconvénients au point de vue de la rigueur de la constance de la température.

On conçoit, en effet, que si des pièces non en communication avec le local où est placée la partie sensible S du régulateur viennent à être mises en communication avec l'extérieur, le refroidissement dans ces pièces ne

puisse pas se communiquer assez rapidement dans la pièce où se trouve la partie sensible S.

Si l'on désire une grande rigueur dans la constance de la température, il y aura donc toujours intérêt à placer un thermo-régulateur sur chacun des tubes t^1 , t^2 , t^3 , placés en branchement sur la conduite principale T H.

Dans le cas particulier où l'on voudrait avoir, dans

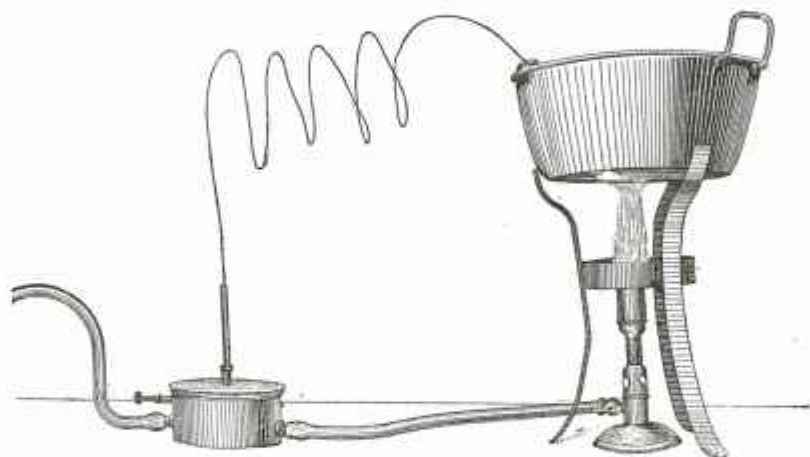


Fig. 11

les différents locaux composant une maison, des températures différentes et réglables à volonté, il faudrait bien entendu un thermo-régulateur dans chaque local.

L'installation de l'appareil, dans les diverses autres

applications énumérées ci-dessus, est analogue à la précédente avec une très légère nuance quand il s'agit du chauffage des voitures de chemins de fer. Dans ce cas, en effet, la vapeur qui est fournie par la chaudière de la locomotive est distribuée aux diverses voitures par une tuyauterie disposée tout le long du train.

Il faut bien entendu un thermo-régulateur par voiture.

DEUXIÈME MODÈLE

Etant donné la vulgarisation du gaz ordinaire d'éclairage et de l'acétylène, ce modèle qui n'est qu'une réduction du précédent est susceptible d'une foule d'applications. Il est représenté en activité de service par la figure 11 dans une de ses applications.

Voici, rangées en groupes, quelques-unes de ces applications :

I. — EN MÉDECINE, EN CHIRURGIE ET DANS L'ART DENTAIRE

Dans la thérapeutique chirurgicale : Stérilisation des instruments et des objets de pansement soit à la chaleur sèche soit à la chaleur humide. Préparation des eaux de lavage.

Dans la thérapeutique médicale, obstétricale, gynécologique. Dans l'art dentaire : cuisson des pièces, etc.

II. — DANS L'USAGE DOMESTIQUE

Chauffage des appartements par le gaz d'éclairage. Préparation des bains à domicile. Emploi dans l'art culinaire : dans les restaurants, les cafés, brasseries, estaminets, etc.

III. — DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Dans la fabrication d'un grand nombre de produits chimiques ou pharmaceutiques. Dans tous les laboratoires petits et grands quelle que soit leur spécialité.

Nous ne développerons pas les applications des groupes I et III, les intéressés comprenant suffisamment combien est précieux, pour leur spécialité, l'instrument que nous leur offrons.

L'application de l'appareil dans le chauffage des appartements se comprend également sans commentaires tant au point de vue hygiénique qu'au point de vue économique.

Dans la préparation des bains à domicile, l'appareil épargnera de nombreux désagréments : Une fois l'eau introduite dans la baignoire, il suffira d'allumer l: rampe à gaz qui doit chauffer le bain, l'eau sera portée ainsi à

la température désirée qui restera constante pendant toute la durée du bain. On n'aura donc plus à extraire de l'eau chaude de la baignoire ou à y ajouter de l'eau froide si la température est trouvée trop élevée par l'intéressé.

Enfin dans l'art culinaire, l'appareil s'impose également pour la préparation ou le maintien des aliments à la température constante. En particulier, il rendra de grands services dans les restaurants, cafés, brasseries, estaminets, où il est nécessaire de maintenir pendant longtemps à une température convenable le café et autres aliments.

TROISIÈME MODÈLE

Ce modèle, le plus simple des trois, est immédiatement applicable dans les cas suivants :

Chauffage des appartements et autres milieux, soit par circulation d'air chaud, soit par circulation d'eau chaude.

Chauffage des voitures de chemins de fer au moyen du thermo-siphon. Régulation de la température fournie dans les appartements par n'importe quel fourneau où l'on brûle de la houille, du coke, du pétrole, de l'alcool et autres combustibles. Refroidissement des appartements par circulation d'air froid, etc...

Dans tous les cas que nous venons de citer et dans les cas similaires, le rôle de l'appareil se ramène à la

manœuvre, en fonction de la température, d'une valve qui, dans le cas du chauffage par circulation d'air chaud ou d'eau chaude et dans le cas de refroidissement par courant d'air froid, doit obstruer plus ou moins le canal de circulation du fluide suivant la valeur de la température.

Dans le cas du chauffage par un fourneau quelconque l'appareil doit manœuvrer, en fonction de la température, l'organe de tirage ou d'appel d'air qui peut être

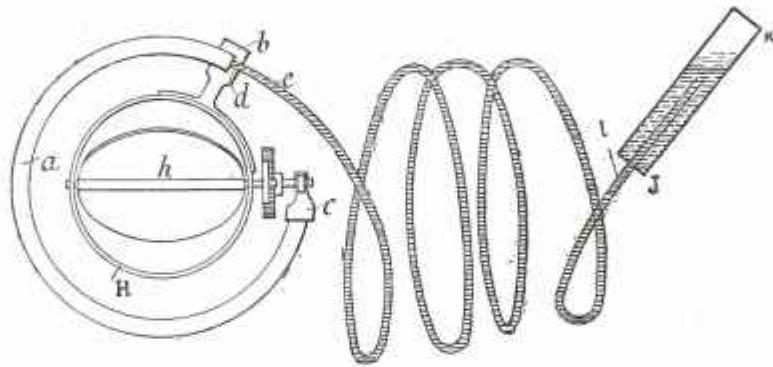


Fig. 12

également une valve ou tout autre dispositif. Comme exemple d'installation dans les applications que nous venons de citer, nous nous bornerons au cas de la figure 12 ; car, dans ces applications, le rôle et le montage de l'appareil sont assez faciles à comprendre pour que dans chaque cas, chacun puisse se faire une idée nette de cette installation.

Ce modèle offre un deuxième moyen de régulariser

la température d'un appartement chauffé par la vapeur. Reportons-nous, en effet, au schéma de l'installation représentée par la figure 10. Au lieu de n'admettre dans la canalisation de chauffage que la quantité de vapeur nécessaire pour que la température reste constante dans l'appartement, comme le fait le modèle n° 1, représenté en T, nous pouvons, avec le modèle n° 3, agir sur les organes de tirage du foyer et de la cheminée de façon à régler la température du foyer *en fonction de la température désirée de l'appartement*.

Ces organes de tirage existent dans toute installation bien comprise de chauffage à la vapeur ; mais, dans ces installations, les mouvements de ces organes sont fonction soit de la pression soit de la température dans la chaudière et non pas de la température dans l'appartement à chauffer ; ce qui constitue une énorme différence au point de vue économique aussi bien qu'au point de vue de la constance de la température.

Dans le cas, en effet, où le tirage du foyer et de la cheminée est commandé par les variations de température de l'appartement à chauffer, on ne brûle que juste la quantité de combustible nécessaire pour entretenir cette température.

Thermomètres et thermo-régulateurs scientifiquement parfaits

Nous avons vu précédemment que, grâce aux deux

principes sur lesquels ils reposent, les appareils qui font l'objet de cette brochure ne comportent que deux corrections :

- 1^o Une correction de différence de niveau ;
- 2^o Une correction des variations de la pression atmosphérique.

Ces deux corrections n'exigent aucune hypothèse pour être effectuées et sont tout à fait bien déterminées puisqu'elles se réduisent chacune à la mesure d'une longueur : distance verticale entre deux points et hauteur barométrique.

Si l'on considère, d'ailleurs, que, dans le cas le plus défavorable, une erreur de 7 millimètres dans la mesure de la hauteur barométrique ou de 0 m. 10 dans la mesure de la différence de niveau ne produit pas une erreur de 1/10 de degré dans l'évaluation de la température, on voit que la personne la moins exercée peut effectuer ces deux corrections.

Toutefois, pour éviter l'observation répétée du baromètre et afin de rendre scientifiquement parfaits les appareils que nous venons de décrire, nous avons cherché et nous sommes parvenus à supprimer complètement ces deux corrections.

Ce résultat est obtenu par l'opposition de deux organes moteurs et par l'adjonction au tube flexible dont on a parlé, d'un second tube flexible exactement semblable au premier et aboutissant à un second réservoir juxtaposé au réservoir sensible, ce second système renfer-

mant seulement le liquide intermédiaire contenu dans le premier.

Application des appareils précédents à la mesure des hautes températures dans la grande Métallurgie : Hauts Fourneaux, Cubilots, Creusets, etc. Préparation des aciers et des alliages. Industrie sucrière

On conçoit facilement que, dans ces applications, la sensibilité et la disposition des thermomètres restent les mêmes et qu'il n'y ait que le réservoir sensible à modifier.

Ce réservoir est constitué par deux tubes A et B (fig. 13)

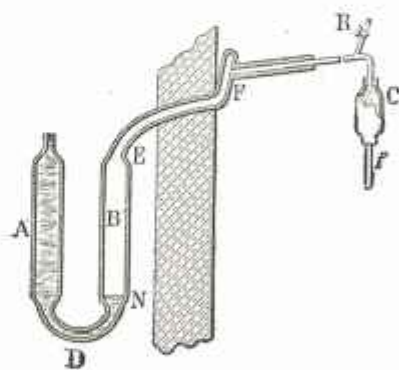


Fig. 13

de porcelaine ou autre matière réfractaire, de capacités

convenablement calculées et communiquant entre eux par un tube D de petit diamètre intérieur. La partie supérieure EF du tube B est inclinée et porte une tubulure FC; cette tubulure, pouvant être en porcelaine, en nickel ou en fer, débouche à la partie supérieure d'une cuvette C remplie de mercure ou du liquide inerte qui remplit le tube moteur et le tube flexible de l'appareil. Pour charger ce réservoir, le tube FC étant détaché de la cuvette C, on coule dans le tube A et dans la tubulure D, jusqu'au niveau N, un métal dont le point de fusion est plus ou moins élevé suivant les températures que l'appareil doit indiquer, puis, l'extrémité C du tube FC étant raccordée à la cuvette C, on introduit dans la partie NBEFC, par le robinet R, un gaz tel que de l'azote, de l'hydrogène ou même de l'air sous une pression convenable.

Pour fixer les idées, supposons qu'il s'agisse d'évaluer des températures comprises entre 500° et 1.000°, le métal contenu dans la branche A étant du zinc, on placera l'appareil dans le haut fourneau ou dans le cubilot où se trouve le métal à chauffer, comme l'indique la figure 13, la partie supérieure inclinée du tube B traversant la paroi du haut fourneau. Le zinc fondant à 420 degrés C environ se vaporisera au-dessus de cette température de sorte que si l'on considère que la tension de la vapeur de zinc dans le tube NBEF est régie par le principe de Watt (paroi froide), la tension de la vapeur saturée de zinc dans le tube de gauche A

produira une dénivellation du zinc fondu qui comprimera le gaz contenu dans la capacité N B E F C.

Si, de plus, on veut bien se rappeler la loi des tensions de vapeurs saturées, on verra que tout se passe comme si la tension de la vapeur saturée de zinc agissait directement sur un liquide incompressible au lieu d'agir sur une colonne gazeuse et que l'appareil, ne perdant aucune de ses qualités, permet d'évaluer ou de régulariser avec autant de précision une température de 1.200 degrés qu'une température de 40 degrés.

Le thermomètre enregistreur que commande le réservoir que nous venons de décrire est un appareil sans correction, se composant de deux boîtes anéroïdes opposées et de deux tubes flexibles faisant communiquer ces deux boîtes avec la cuvette C d'une part, et avec un réservoir cylindrique juxtaposé à cette cuvette d'autre part.

Appareils pour l'évaluation des très hautes températures

Pour évaluer les températures au-dessus de 1.200 degrés, il n'est pas prudent de plonger directement les réservoirs disposés comme nous venons de le dire, dans le milieu dont il s'agit de connaître la température.

On est donc obligé d'employer un procédé indirect, qui repose sur le principe suivant :

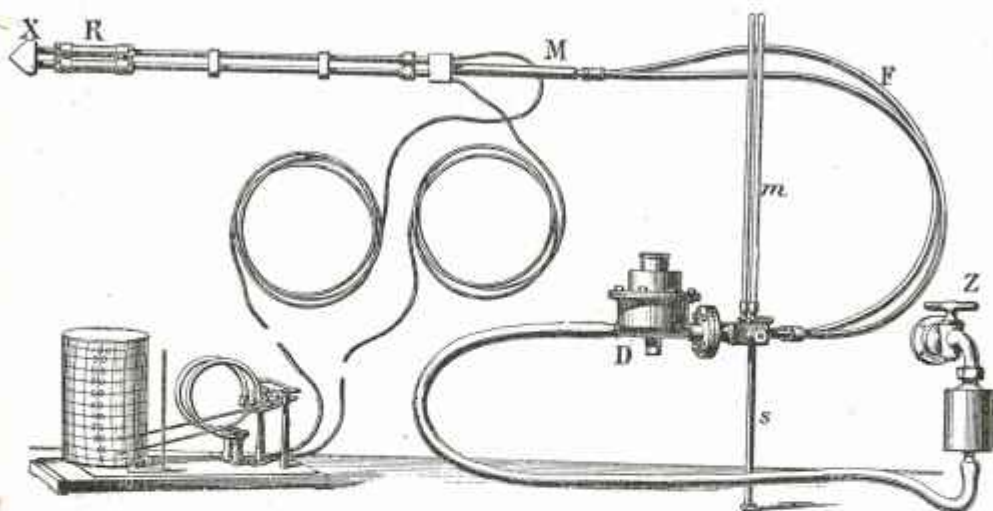


Fig. 14.

Si, dans un tube, convenablement disposé dans le foyer dont on veut connaître la température, on fait passer un courant d'eau avec une vitesse constante et suffisamment grande pour que l'eau ne puisse pas se vaporiser, la différence de la température de l'eau à sa rentrée et à sa sortie du tube est proportionnelle à la température du foyer.

Ce principe connu est mis en pratique au moyen du dispositif suivant :

Deux tubes, disposés parallèlement, sont mis en communication entre eux au moyen d'une pièce X en acier trempé et ayant la forme d'une lance, pour

faciliter son introduction dans le foyer pouvant contenir des corps durs.

Cette pièce est percée d'un canal intérieur faisant communiquer les deux tubes qui aboutissent d'autre part à une boîte portant quatre tubulures dont deux sont mises en communication par des tubes métalliques flexibles *F* à grande section avec un détendeur régulateur *D* de notre système, dont le fonctionnement est absolument assuré ; dans les deux autres tubulures, on fait passer les tubes flexibles d'un thermomètre ou d'un thermo-régulateur sans correction, suivant qu'il s'agit d'évaluer ou de régulariser la température ; les réservoirs sensibles pénètrent dans les renflements *R* des tubes parallèles, ces renflements se trouvant à une distance de 5 centimètres environ de la lance *X*.

Pour se servir de l'appareil, on met la tubulure de sortie du détendeur régulateur en communication avec une canalisation d'eau *Z*, puis on agit sur la molette du détendeur de façon à donner à l'eau de circulation, à sa sortie du détendeur, la pression voulue, cette pression étant mesurée par des manomètres à eau *m* disposés sur l'appareil.

L'eau, à la sortie du détendeur, traverse la série des tubes par l'intermédiaire du canal percé dans la lance *X*, se met en équilibre de température avec les réservoirs sensibles des thermomètres et sort de l'appareil par le tube *s*.

Le principe sur lequel repose l'appareil que nous

venons de décrire a été appliqué pour la première fois par M. de Saintignon et ensuite par bien d'autres constructeurs pour l'évaluation des hautes températures, mais dans des conditions tout à fait désavantageuses.

En effet, la condition essentielle pour obtenir des résultats sur lesquels on puisse compter, c'est d'avoir à sa disposition un thermomètre à distance dont la partie sensible soit rigoureusement localisée au réservoir et on sait qu'aucun thermomètre à dilatation ne peut réaliser cette condition.

On conçoit, en effet, que si les tiges de ces thermomètres sont sensibles à la chaleur au même degré que les réservoirs, la température indiquée n'est plus la température qu'il s'agit de connaître, mais représente la résultante des effets thermiques qui se font sentir sur toutes les parties de l'appareil.

Si la température est prise en dehors du foyer, le résultat est encore plus mauvais.

Dans l'appareil que nous venons de décrire, les réservoirs contenus dans les renflements R étant les seules parties des thermomètres sensibles à la chaleur, ces erreurs n'existent pas. De plus, l'entrée et la sortie de l'eau dans l'explorateur se faisant toujours au même niveau, cet explorateur peut être orienté dans tous les sens. En outre, grâce au détendeur régulateur dont le bon fonctionnement est garanti par douze ans de pratique courante, ce thermomètre peut être placé

sur une canalisation d'eau quelconque et n'exige pas l'installation de réservoir à niveau constant ; il y a donc lieu d'espérer que cet appareil rendra d'importants services dans les industries de la grande métallurgie, de la céramique, des ciments, etc... qui ne disposent d'aucun appareil similaire.

Appareils spéciaux pour différences de niveau très considérables

Dans certains cas, par exemple, quand il s'agit d'évaluer la température du sommet d'une montagne au pied de cette montagne ou la température du fond d'un puits de mine à la surface du sol, on peut avoir à tenir compte de différences de niveau atteignant plusieurs kilomètres. Dans ce cas, il est évident qu'il est impossible d'employer un liquide comme fluide intermédiaire, la pression de la colonne liquide sur les organes moteurs étant de l'ordre de grandeur ou dépassant la tension maxima du liquide sensible contenu dans le réservoir. On remplace alors le liquide intermédiaire par un gaz (air ou azote) à une pression convenable.

Thermomètres à tige de verre

Dans l'application de la loi des tensions de vapeur à la mesure des températures et pour conserver à cette loi toute sa rigueur dans les mesures de haute précision, on peut construire des thermomètres à tige de verre dont la figure 15 donne un exemple. L'appareil que cette figure représente est à éther dont la tension maxima est mesurée par la hauteur de colonne mercurielle comptée à partir du niveau du mercure dans le réservoir, jusqu'au plan horizontal passant par le sommet du ménisque dans le tube capillaire où le vide le plus parfait a été pratiqué.

L'observation de cet instrument se fait d'une façon identique à celle du baromètre à mercure.

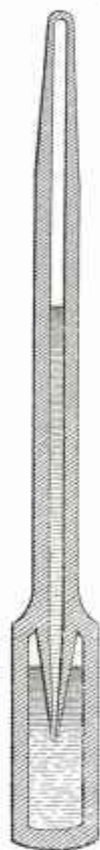


Fig. 15.