



TECHNIQUE

DE

L'AUTOMATISME

appliqué au chauffage,
à la réfrigération et au
conditionnement de l'air

par

F. GHILARDI

Ingénieur-Expert des Tribunaux,
Professeur à l'Institut français du Froid Industriel
Membre de la Commission Supérieure du Chauffage
et Expert du Ministère de la Reconstruction.



LIBRAIRIE DES SCIENCES
GIRARDOT & C^{ie}
27, quai des Grands-Augustins, Paris-6^e

—
1948



CHAPITRE II

ÉTUDE GÉNÉRALE DES APPAREILS DE RÉGULATION

APPAREILS THERMOSTATIQUES

ETUDE PARTICULIÈRE DU THERMOSTAT.

Etant donné l'importance de cet appareil dans nos industries, nous allons donner un certain développement à son étude, étant bien entendu que beaucoup de dispositions applicables au thermostat le sont également à d'autres appareils de régulation automatique tels que : régulateurs de pression ou d'humidité, ce qui nous évitera de les décrire en détail lorsque nous parlerons de ces différents appareils.

Le thermostat est un appareil destiné à mesurer une température et à agir sur un organe de commande modifiant la production de chaleur ou de froid, dans le sens nécessaire, pour ramener la température mesurée à la valeur fixée d'avance. Le thermostat comprend donc : d'une part, un thermomètre, d'autre part un organe de commande pouvant être soit électrique (interrupteur, commutateur ou rhéostat), soit pneumatique (fuite d'air réglable), soit hydraulique (vanne de passage de liquide) avec interposition entre les deux organes précédents d'un lien mécanique de transmission d'ordre.

Cet organe mécanique est généralement composé de leviers, d'engrenages, de fils de tension avec ou sans interposition de ressorts, permettant de modifier la position relative des organes et de modifier ainsi le réglage de l'appareil.

Organe thermométrique : N'importe quel thermomètre peut, théoriquement, servir à la construction d'un thermostat.

Nous pourrions donc avoir affaire soit à :

- un thermomètre à dilatation de liquide sous tube de verre,
- un thermomètre à dilatation de liquide sous bulbe métallique,
- un thermomètre à dilatation de gaz,
- un thermomètre à tension de vapeur saturante,
- un thermomètre à dilatation métallique soit sous forme de tiges parallèles, soit sous forme de bi-lame.

Nous allons examiner successivement ces différents thermostats.

THERMOSTAT A MERCURE SOUS VERRE.

La première idée qui vient à l'esprit est de se servir du thermomètre ordinaire à mercure qui se prête particulièrement bien à la commande du circuit électrique puisque nous pourrions placer dans la tige de verre une électrode à la hauteur voulue pour que le contact s'établisse entre elle et la colonne mercurielle, au moment où cette colonne atteint le degré désiré.

En pratique, on a fait des thermostats basés sur ce principe et on y trouve généralement l'avantage de pouvoir augmenter presque à volonté leur sensibilité puisqu'il suffit d'employer un réservoir de mercure de grande capacité et une colonne mercurielle extrêmement fine pour que les déplacements de la colonne soient aussi grands que l'on désire pour une variation de température donnée.

En fait, on peut assez facilement fabriquer un thermomètre gradué en $1/10^{\text{e}}$ de degré centigrade, la variation des hauteurs de mercure pouvant atteindre 1 cm. pour 1° . Le thermostat à colonne mercurielle sous verre pourra donc facilement être un appareil de haute précision en ce qui concerne les variations de température.

Par contre, on connaît toutes les difficultés pour fabriquer convenablement un thermomètre à mercure de précision. On sait en particulier que le verre étant une solution colloïdale, se modifie dans le temps et que, même en lui faisant subir des alternatives de recuit, il est très difficile d'obtenir un verre véritablement stable. C'est ce qui explique que les thermomètres de précision, malgré toutes les précautions qu'on ait



apportées à leur fabrication, subissent le phénomène connu en métrologie sous le nom de déplacement du zéro : au bout d'un certain temps de vieillissement, la colonne mercurielle ne repasse plus par la graduation zéro lorsqu'on plonge l'appareil dans la glace fondante et ce déplacement qui peut atteindre plusieurs $1/10^e$ de degré dans les appareils de laboratoire, dépasserait facilement plusieurs degrés dans les appareils fabriqués plus rapidement et sans les précautions minutieuses que l'on peut employer en métrologie de précision.

D'autre part, le calibrage très exact de la colonne capillaire est une opération excessivement délicate et qu'on ne peut véritablement faire convenablement qu'en laboratoire, en examinant au microscope la variation de longueur d'une gouttelette de mercure parcourant toute la longueur du tube capillaire.

Faute de cette précaution indispensable et qui sera pratiquement inapplicable pour les appareils industriels, notre colonne capillaire ne pourra jamais être rigoureusement cylindrique et uniforme et il sera donc impossible de graduer exactement avec la même échelle deux thermomètres.

Enfin, l'exactitude de l'appareil n'est véritable que si l'ensemble de l'appareil : réservoir et tige, est entièrement à la même température, ce qui n'est pas toujours possible notamment lorsque l'on plonge un réservoir dans un fluide froid tandis que la tige est fixée sur un bâti relativement chaud.

La dilatation du mercure étant de..... 0,000181
tandis que celle du verre est de..... 0,000021

La différence de dilatation ressort à..... 0,000160

Le volume représenté par un degré dans la tige est de $\frac{16}{100.000^e}$
du volume du bulbe. L'erreur provenant de ce que la tige n'est pas à la même température que le bulbe peut atteindre $1/60^e$ de la différence de température entre le bulbe et la tige aux environs de 100 degrés.

Lorsqu'on examine au microscope le mouvement de la colonne mercurielle lors d'une variation de température, on s'aperçoit que le mouvement de la colonne n'est pas du tout régulier, comme on pourrait le penser. Le mercure semble s'accrocher aux parois du tube, le mercure ne mouillant pas le verre, et s'avance par sauts successifs. Le mouvement étant



discontinu et imprévisible, ce phénomène empêche pratiquement de faire des thermomètres en verre de très haute précision. Il limite le diamètre intérieur du tube capillaire aux environs de 0,6 mm., si bien que l'extrême sensibilité que nous avons pu espérer se trouve pratiquement limitée aux environs du $1/10^{\text{e}}$ de degré.

On sait que le mercure se congèle à -39° et devient visqueux une dizaine de degrés au-dessus de cette température. Il ne sera donc applicable en réfrigération que jusqu'à des températures avoisinant -30° et même -25° .

Enfin, le thermomètre en verre est fragile et malgré toutes les dispositions qu'on pourra adjoindre pour le protéger des chocs il sera souvent difficile à employer dans l'industrie.

Lorsque l'on veut se servir du thermomètre à mercure sous verre comme thermostat nous avons dit qu'il suffisait de traverser le tube de verre par une électrode métallique pour obtenir le contact électrique au moment où la colonne mercurielle atteint cette électrode. C'est dire que la transformation du thermomètre à mercure en thermostat semble à priori extrêmement simple.

Cette simplicité apparente est diminuée si l'on veut tenir compte des remarques suivantes :

Le moyen simple indiqué ci-dessus n'est valable que si nous désirons régler une température invariablement fixée dès l'origine sans possibilité de la modifier par la suite, ni même de rattraper les écarts accidentels, notamment ceux dus au déplacement du zéro de l'appareil.

Si au contraire, on veut rendre variable le réglage de l'appareil il faut :

— ou bien placer plusieurs électrodes à des hauteurs différentes et réunir celle que l'on désire au circuit électrique. Dans ce cas, notre réglage n'est plus continu et nous devons multiplier le nombre des électrodes pour obtenir une exactitude suffisante. Il est à craindre aussi que nous modifiions beaucoup la forme intérieure du tube de verre car la fixation d'une électrode ne va pas sans boursoufler l'intérieur du tube, ce qui risque de modifier beaucoup le fonctionnement de l'appareil.

— ou bien nous serons amenés à laisser ouverte la partie supérieure du tube de verre et à plonger dans l'intérieur de celui-ci une électrode dont la hauteur pourra être modifiée de l'extérieur au moyen d'une vis micrométrique (fig. 10). L'appa-



reil devient déjà beaucoup plus compliqué et l'ouverture du tube nous empêche de prendre la précaution, que nous indiquerons plus loin, de placer l'extrémité de la colonne mercurielle dans une atmosphère neutre évitant l'oxydation du mercure.

En effet, à chaque fois que la colonne mercurielle arrive lentement au contact de l'électrode, puis qu'en sens inverse elle s'en éloigne lentement, il se produit entre les deux parties

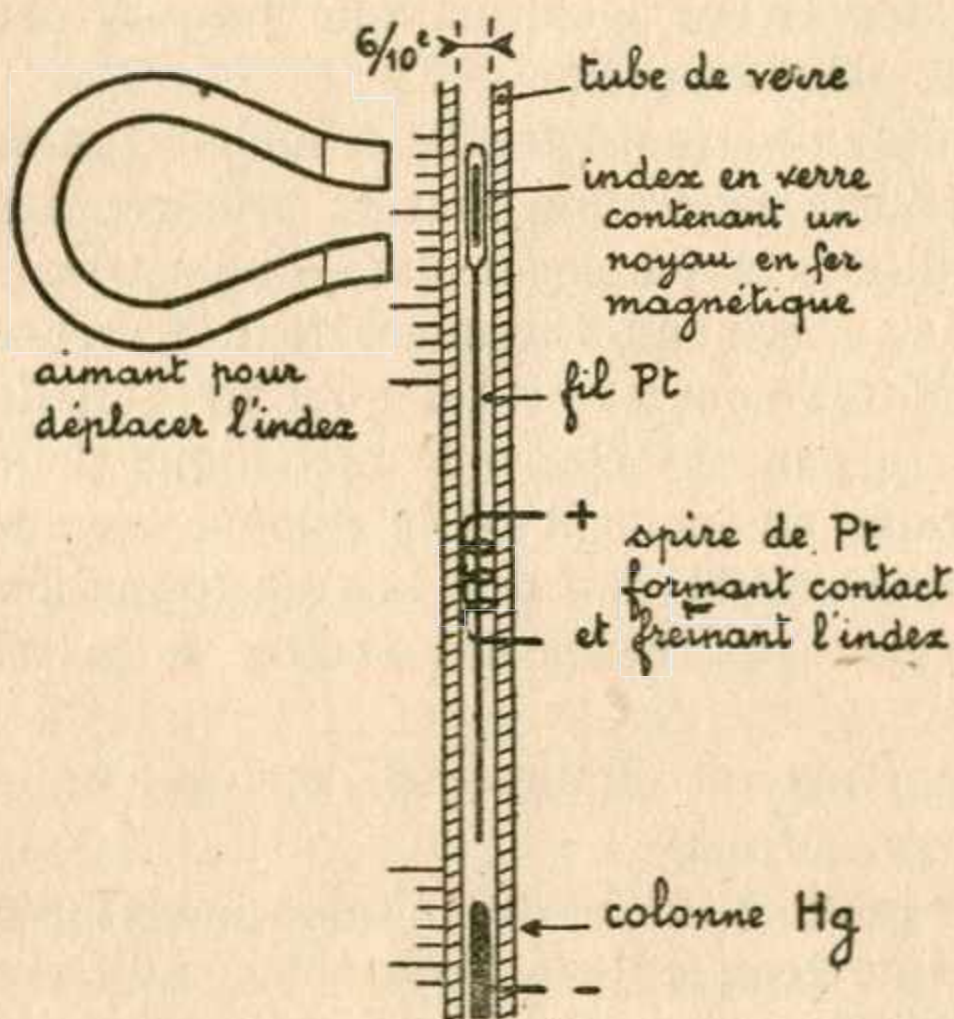


Fig. 10. — Détail d'un thermostat réglable à contact (Conin)

du circuit une étincelle d'extra-courant de fermeture ou de rupture, d'autant plus violente que la puissance électrique en jeu est plus grande, c'est-à-dire que la force électro-motrice est elle-même plus grande, que la résistance du circuit est plus faible ; enfin que la réactance positive ou négative, provenant de selfs ou de capacités intervient pour accumuler momentanément de l'énergie électrique

dans le circuit, cette énergie venant s'ajouter à l'énergie utile pour augmenter la valeur destructive de l'étincelle (1). Il est donc indispensable, pour maintenir en bon état le thermostat à mercure, de protéger ce liquide contre les oxydations qui se produisent inmanquablement sous l'action de l'étincelle électrique.

On a cherché à protéger la colonne mercurielle en la surmontant d'une atmosphère gazeuse sous pression dans laquelle l'étincelle éclate plus difficilement. Si cette atmosphère est rigoureusement exempte d'oxygène et de vapeur d'eau et cons-

(1) On doit se rappeler que l'interposition d'un condensateur entre les deux électrodes a pour résultat de dériver une partie de l'extra-courant de rupture et de diminuer l'énergie de l'étincelle de rupture.

tituée par de l'hydrogène pur, ce gaz a l'avantage d'être bon conducteur de la chaleur et de refroidir l'étincelle qui tend à s'éteindre plus vite.

On a aussi essayé de surmonter la colonne mercurielle avec une goutte d'huile minérale formant un bon isolant électrique et refroidissant très activement l'étincelle. Bien entendu et concurremment à tous ces moyens on a posé en principe que le thermostat électrique ne devait fonctionner que sur un circuit transportant une énergie électrique extrêmement faible sous un voltage de quelques volts seulement.

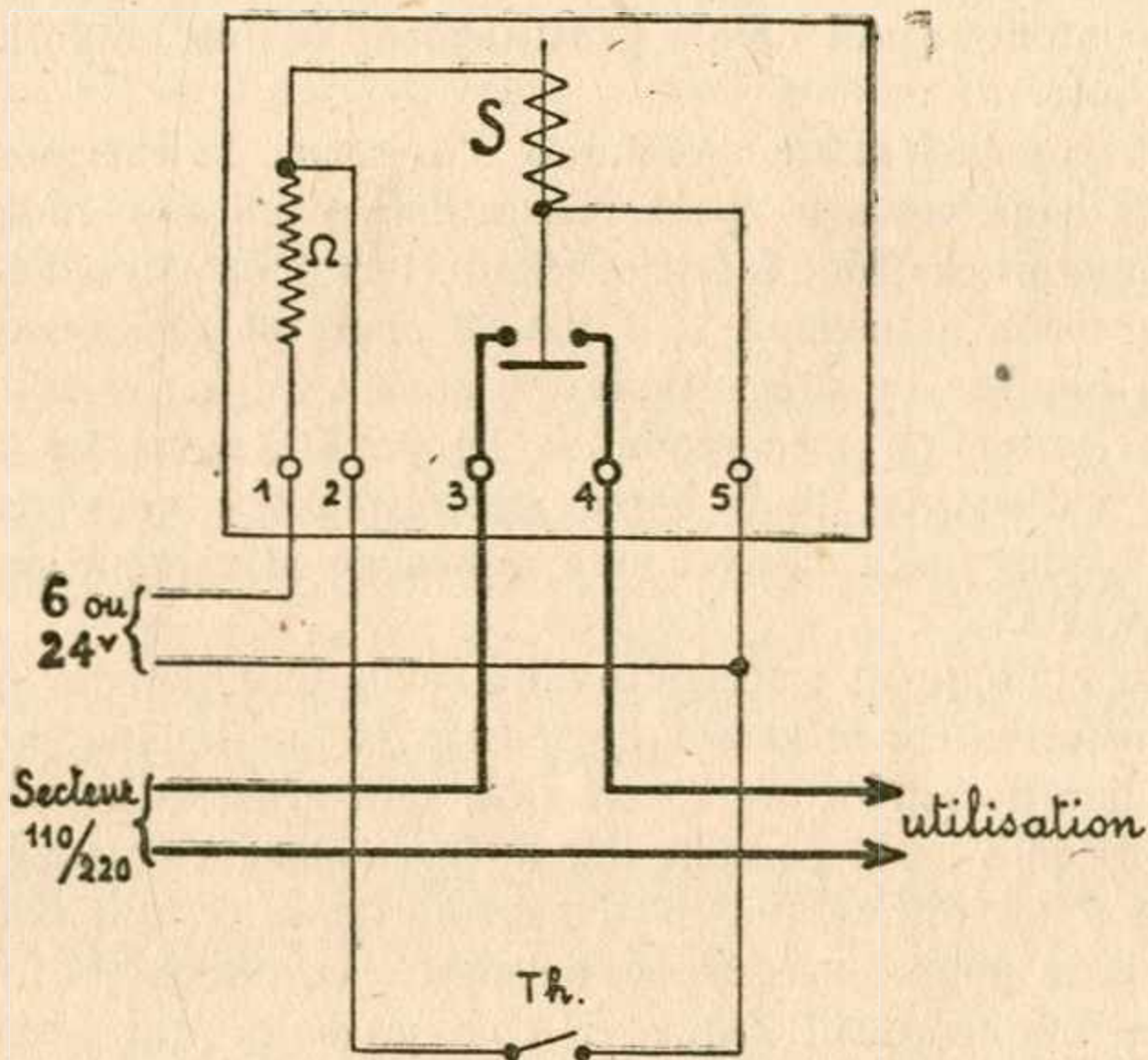


Fig. 11. — Relais sans coupure du thermostat pour thermomètre à contact.

Les précautions qui sont indiquées plus haut ne sont d'ailleurs pas facilement applicables partout : l'atmosphère d'hydrogène pur ne peut être maintenue que si le tube est rigoureusement clos à la partie supérieure, ce qui élimine le moyen de réglage dont nous avons déjà parlé. D'autre part, la goutte d'huile ne reste malheureusement pas à la partie supérieure du mercure car elle a tendance à s'insinuer entre le mercure et le verre (le mercure ne mouillant pas le verre) et à se diffuser ainsi dans tout l'appareil en cessant de jouer son rôle et en

faussant d'ailleurs les indications du thermomètre puisqu'elle déplace ainsi par sa présence, la colonne mercurielle.

On a imaginé bien d'autres artifices pour rendre utilisable le thermostat à mercure. Notamment, on a pensé à placer à la partie supérieure du mercure un petit index en fer émaillé qui suit ainsi les mouvements de la colonne et à se servir de cet index en fer pour modifier les constantes magnétiques d'une bobine entourant le tube de verre et à se servir de cette bobine à self variable pour faire fonctionner un relais. De cette manière on supprime tout contact électrique entre le mercure et le circuit extérieur mais moyennant un dispositif assez compliqué qui oblige généralement à une amplification importante.

En conclusion, nous sommes d'avis que le thermostat à mercure sous verre ne peut être utilisé dans nos industries que dans des cas tout à fait spéciaux, lorsqu'on nous demande une précision atteignant le $1/10^e$ de degré et moyennant un certain nombre de précautions qui sont :

- Protection mécanique de l'appareil contre les chocs,
- Utilisation d'une force électro-motrice ne dépassant pas quelques volts et avec une puissance atteignant au plus 4 à 5 watts.

Par conséquent : nécessité d'un relais sensible comprenant un transformateur-abaisseur de tension et une bobine shuntée. Il y a lieu de remarquer encore que, sauf artifices mécaniques ou électriques assez compliqués, le thermostat à colonne mercurielle a un différentiel extrêmement faible et non réglable, ce qui aura pour conséquence, de mettre en marche ou d'arrêter très fréquemment l'appareil commandé ce qui n'est pas toujours compatible avec son bon fonctionnement.

THERMOSTAT A LIQUIDE SOUS VERRE.

On pourrait utiliser les thermomètres à dilatation de liquide sous verre chargés avec des hydrocarbures très dilatables. On sait en effet, que les hydrocarbures ont un coefficient de dilatation très supérieur à celui du mercure ce qui les rend particulièrement aptes à la constitution d'un thermomètre ; par exemple, le toluène a un coefficient de dilatation cubique de 0,001, le pentane de 0,0016 tandis que le mercure n'a qu'un coefficient de 0,00018.

Pour pouvoir se servir de thermomètres à hydrocarbure, il faudrait les constituer de manière à ce que la dilatation de l'hydrocarbure pousse un index métallique pouvant être soit en fer émaillé, soit une goutte de mercure et nous aurons les mêmes avantages et les mêmes inconvénients que dans le thermomètre à mercure, avec cette différence que les hydrocarbures liquides mouillent le verre tandis que le mercure ne le mouillant pas, le ménisque de l'hydrocarbure a sa convexité dirigée vers le haut, tandis que le mercure a sa convexité dirigée vers le bas.

Grâce à cette capillarité positive, la colonne de l'hydrocarbure poussée par la dilatation a tendance à monter très facilement lors d'une élévation de température ; elle ne redescend que difficilement lors d'un abaissement de température. C'est le phénomène inverse qu'on observe avec le mercure qui ne mouille pas le verre et dont le poids plus élevé facilite la descente et s'oppose à la montée.

La capillarité tend aussi à faire descendre l'hydrocarbure tout le long du tube capillaire ce qui diminue la hauteur de la colonne et fausse les indications de l'appareil.

Certains hydrocarbures ont un point de congélation très bas ce qui les rend particulièrement intéressants dans l'industrie frigorifique, notamment le toluène qui peut servir jusqu'à des températures extrêmement basses.

THERMOSTATS A DILATATION DE LIQUIDE SOUS ENVELOPPE MÉTALLIQUE.

On peut enfermer un liquide dilatable (par exemple un hydrocarbure ou le mercure) dans une enveloppe métallique déformable et mesurer cette déformation qui est fonction de la température du liquide intérieur. L'enveloppe peut être constituée soit par un soufflet, un tube plissé ou cintré ou une boîte plate dont la déformation sera mesurée ou transmise avec amplification par un système de levier. On a également utilisé le tube Bourdon qui est simplement recourbé sur lui-même et dont la forme tend à se rapprocher d'une ligne droite lorsque la pression intérieure augmente. Dans tous ces appareils, l'effort antagoniste est fourni d'une part par la pression atmosphérique extérieure, d'autre part par un ressort réglable.



Les indications de ces appareils seront donc faussées par les variations de la pression atmosphérique (altitude au-dessus du niveau de la mer et variations météorologiques) ainsi que par les modifications, dans le temps, des qualités du ressort antagoniste.

On sait en effet que les alliages servant à la constitution du ressort sont constitués par des solutions solides généralement instables et dont les propriétés mécaniques changent sous l'influence des variations de température, des chocs et de la fatigue due au fonctionnement même de l'appareil.

Les liquides les plus employés sont le mercure et certains hydrocarbures, notamment le toluène.

Les fuites de liquide sont peu à craindre et immédiatement visibles, les causes d'erreur sont dues à la compressibilité du liquide dont on peut tenir compte par étalonnage préalable et au retard de la conductibilité thermique des liquides ayant généralement une capacité calorifique relativement grande, ce qui explique la lenteur de l'équilibre thermique de ces appareils.

Le liquide thermométrique étant au repos à l'intérieur du bulbe et les mouvements de convection étant très faibles surtout lorsque le liquide est lui-même visqueux, on diminue les inconvénients de cette inertie thermique en donnant au bulbe thermométrique une forme augmentant la surface latérale de contact par rapport au volume de fluide enfermé, c'est-à-dire en constituant le bulbe avec le tube aplati ou en le munissant d'ailettes métalliques soudées sur le bulbe, à moins que l'on préfère donner à ce réservoir une forme plissée augmentant beaucoup la surface latérale. Dans ce cas, il est cependant à craindre que la déformation du réservoir vienne troubler les indications de l'appareil.

THERMOSTATS A GAZ.

Les thermomètres à gaz permanent, c'est-à-dire non liquéfiable dans les conditions d'emploi de l'appareil, donnent des appareils très précis, très sensibles, qu'on peut utiliser soit à pression constante en faisant refouler par le gaz une colonne liquide qui indique ainsi le volume occupé par le gaz, soit au contraire à volume constant en transformant la dila-



tation du gaz en une pression qu'on pourra mesurer facilement au moyen d'un manomètre.

Etant donné la compressibilité des gaz, la graduation du manomètre ne sera pas proportionnelle aux températures mesurées, les graduations devenant de plus en plus serrées au fur et à mesure que la température augmente.

Dans ces appareils à gaz, l'effet de la dilatation de l'enveloppe est peu sensible étant donné le rapport très élevé entre les coefficients de dilatation des gaz et ceux des solides.

Industriellement les thermomètres à gaz permanent sont peu employés étant donné que les fuites (toujours à craindre car les enveloppes sont plus ou moins poreuses) faussent gravement les indications de l'appareil et lui enlèvent toute fidélité.

THERMOSTATS A TENSION DE VAPEUR SATURANTE.

On sait que la pression de vapeur au-dessus du liquide est fonction de la température de ce liquide ou plus exactement de la couche de liquide se trouvant en contact direct avec la phase gazeuse. En mesurant la pression de vapeur dans un réservoir clos contenant une certaine quantité de liquide, on peut donc graduer le manomètre en température.

Cette graduation doit se faire expérimentalement car il y a toujours lieu de tenir compte des impuretés contenues dans le fluide choisi qui viennent modifier d'une façon souvent importante les tensions de vapeur données par les tables.

On choisit de préférence des liquides dont la tension de vapeur est supérieure à la pression atmosphérique. Pour les températures à mesurer dans nos industries, les principaux corps thermométriques employés sont tout d'abord les fluides frigorigènes de l'industrie : le gaz ammoniac, l'anhydride sulfureux, le chlorure de méthyle, les fréons. On emploie aussi suivant les températures à mesurer : le chlorure d'éthyle, l'isopentane, le sulfure de carbone, l'acétone, l'hexane, le benzène, etc...

La variation de pression des gaz facilement liquéfiables n'est pas linéaire aux environs du point de liquéfaction et l'on peut voir sur les courbes ci-contre la variation parabolique

PRESSION : 100 LB/IN² = 7 K/cm²

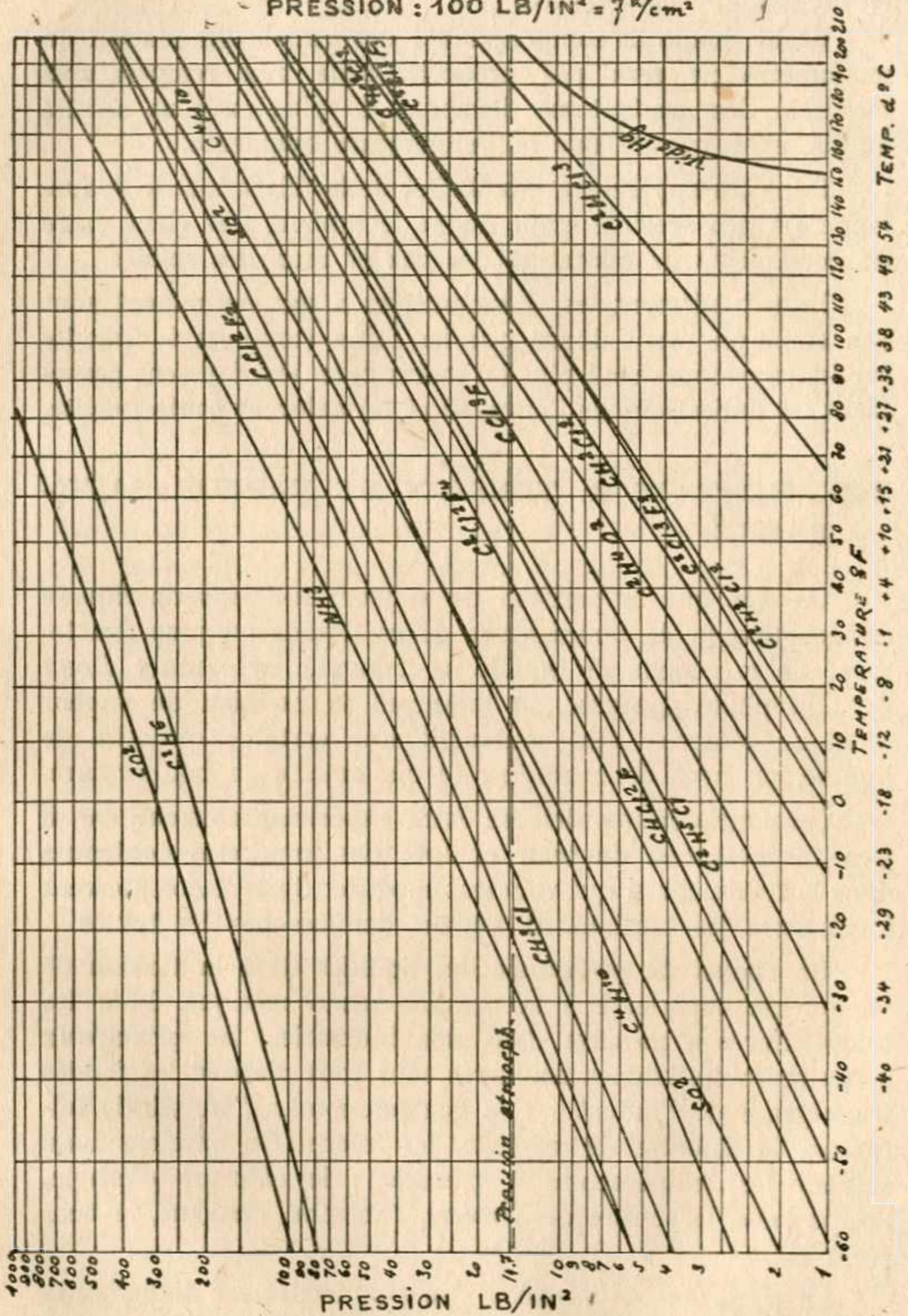


Fig. 12. — Tension de vapeur des gaz liquéfiables utilisables en thermométries.

de cette pression en fonction de la température (fig. 12).

Les valeurs indiquées sont celles qui correspondent à des produits chimiques rigoureusement purs et, comme dans l'industrie, ces corps n'existent pratiquement pas même lors-

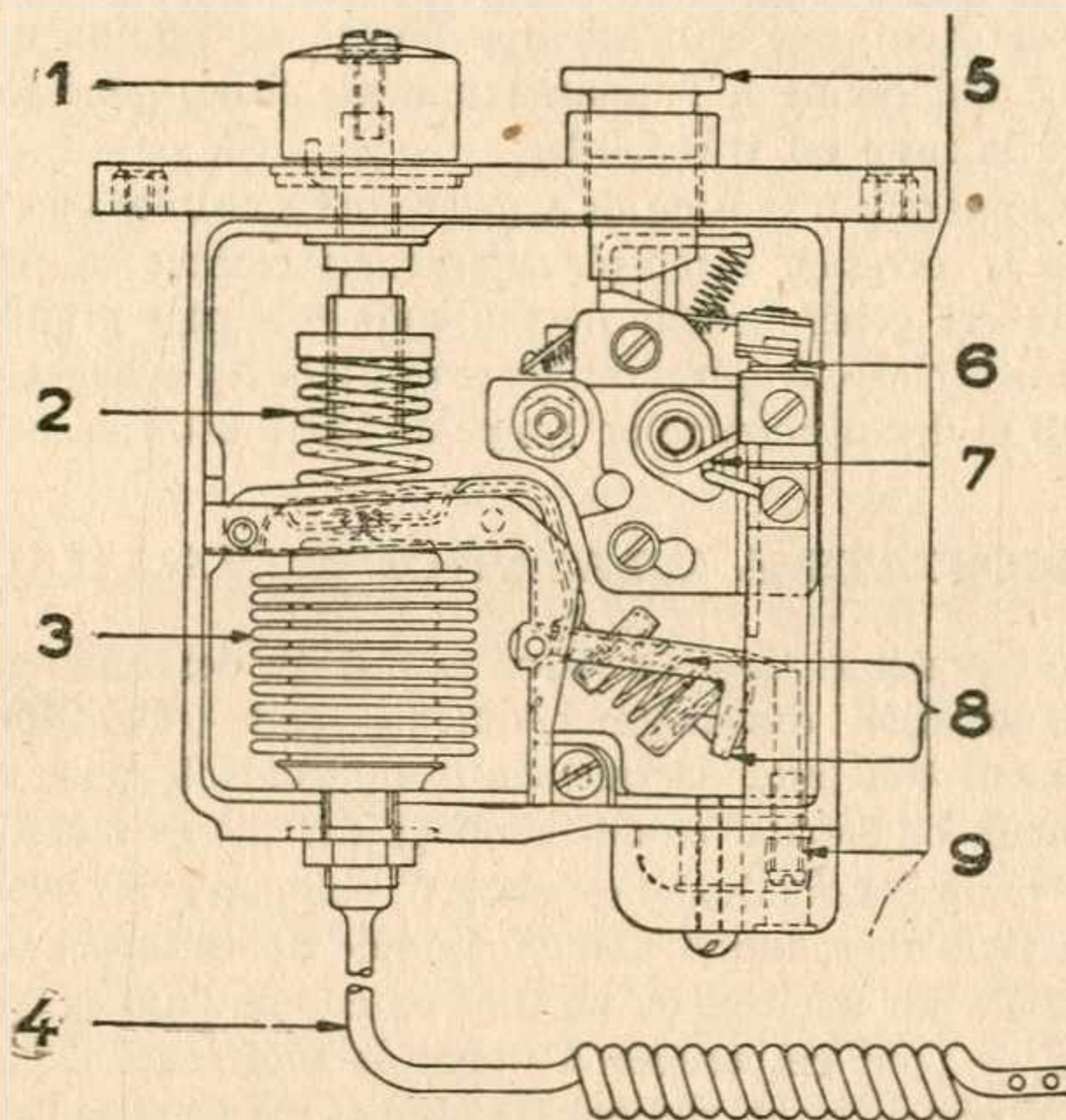


Fig. 13. — Coupe d'un thermostat d'armoire à interrupteur manuel et thermique.

1. Bouton de réglage de la température de coupure. —
 2. Ressort antagoniste. — 3. Tube plissé thermostatique.
 — 4. Tube capillaire. — 5. Bouton interrupteur de réenclenchement du disjoncteur. — 6. Contacts argent. —
 7. Résistance du relais thermique. — Ressort et levier de rupture brusque. — 9. Vis de réglage du différentiel.

qu'on cherche à avoir un produit de laboratoire, il est toujours prudent de faire des expériences exactes sur le produit commercial qu'on a à sa disposition.

Comme on le voit sur les courbes, les différences de pression sont très importantes pour une différence de température donnée, par conséquent, nous aurons avec ces appareils la possibilité d'obtenir un effort très grand sur le levier d'amplification

(1) L'échelle de la figure est logarithmique,



ce qui est un gros avantage pour nos appareils automatiques. Malheureusement, comme pour les thermomètres à gaz, nous aurons des difficultés pour obtenir l'étanchéité parfaite des bulbes, notamment aux points de soudure, mais le danger sera moins grave que pour les thermomètres à gaz car l'appareil reste exact tant que subsiste une goutte de liquide dans le bulbe, ce qui donne à l'appareil une vie utile, généralement longue si la fuite est très faible.

Ces appareils à tension de vapeur sont sensibles aux variations de la pression atmosphérique mais comme la pression intérieure est généralement de plusieurs fois plus grande que la pression atmosphérique, l'influence pratique est négligeable. La figure 13 ci-dessus montre en coupe un thermostat de ce type.

THERMOSTATS A DILATATION MÉTALLIQUE.

Il est possible aussi de baser la mesure des températures sur la dilatation des métaux quoique cette dilatation soit relativement très faible et que son utilisation soit gênée par les phénomènes de flexion et de flambage des pièces métalliques.

La première méthode consiste à comparer la dilatation de deux tiges métalliques, l'une à grande dilatation constituée par exemple par une tige ou un tube en cuivre, l'autre, très peu dilatable — pour cet usage on donne la préférence à certains alliages à base de nickel qui ont été étudiés par Charles-Edouard Guillaume et qui l'ont conduit à la découverte de l'invar, alliage à 36 % de nickel dont le coefficient de dilatation est presque nul.

A titre de renseignements, voici les coefficients de dilatation des métaux les plus courants avec, pour comparaison, le coefficient de dilatation de l'invar :

Cuivre	0,000.016
Fer doux.....	0,000.011
Aluminium	0,000.024
Nickel	0,000.013
Invar	0,000.001

A noter que les propriétés de l'invar sont très variables avec la température et que le coefficient de dilatation ci-dessus n'est valable que pour les températures comprises entre — 50

et $+100^{\circ}$. En deçà et au-delà le coefficient de dilatation varie assez sensiblement.

Dans ce thermostat à tige métallique on constitue souvent l'organe sensible par un tube dilatable à l'intérieur duquel on place une tige en invar. Tube et tige sont fixés ensemble à une extrémité et l'on mesure la différence de dilatation de l'autre extrémité en l'amplifiant beaucoup au moyen de leviers. Avec cette disposition, la surface de contact est grande entre le tube

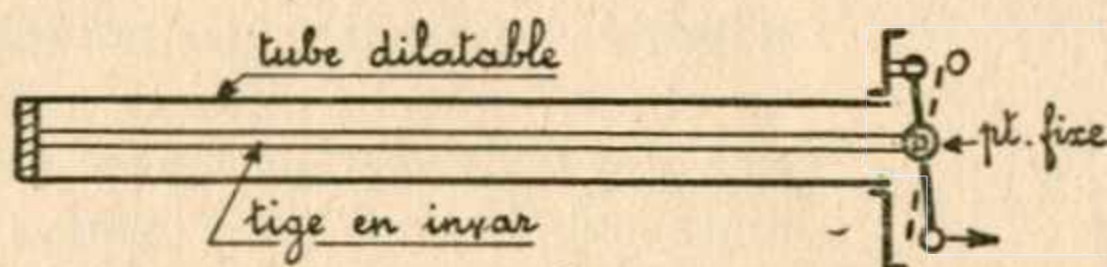


Fig. 14. — Thermostat à tube dilatable.

et le fluide dont on mesure la température, mais il est cependant nécessaire pour obtenir une amplification convenable d'utiliser un élément assez long, souvent de plusieurs dm de longueur, ce qui peut être une gêne dans certaines applications. (1) Ce système a cependant l'avantage de sa grande simplicité, d'une grande robustesse avec la possibilité d'utiliser les forces importantes correspondant aux dilatations métalliques. Il suffit donc que le mouvement amplificateur soit bien construit avec des jeux très restreints pour que l'appareil soit constant et puisse actionner un interrupteur dans des conditions de sécurité parfaites.

Cette question du jeu dans les organes de liaison de nos appareils de régulation mérite une mention spéciale.

Les articulations composées d'un axe cylindrique ou d'un pivot sur crapaudine s'usent en augmentant l'écart entre les diamètres mâle et femelle. Le point d'appui se déplace suivant que l'effort est dirigé dans un sens ou dans le sens contraire. Des erreurs importantes peuvent en découler. Le moyen le plus efficace de s'opposer à ces mouvements est d'employer le système du couteau reposant sur un V, les deux pièces étant appuyées l'une contre l'autre par un ressort. Dans ces conditions, le point d'appui reste fixe et ne peut s'abaisser que de la valeur de l'usure du couteau et du V. Ces pièces étant réalisées en acier trempé, l'usure est d'ailleurs minime.

(1) La température mesurée est la moyenne des températures tout le long de la tige.

Appareils à bilame. (fig. 15)

Un moyen extrêmement séduisant consiste à utiliser les bilames qui sont constituées par deux lames de métaux différents laminés ensemble et qui forment ainsi une lame composite ayant une grande résistance mécanique.

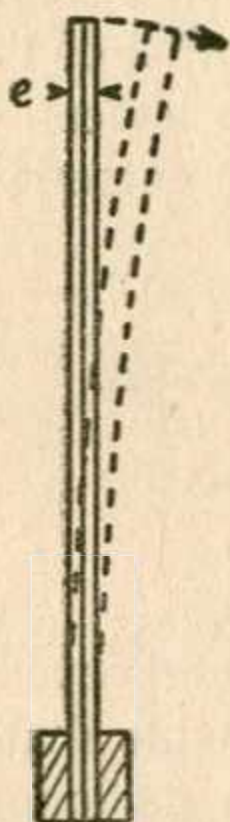


Fig. 15. — Bilame.

Si l'on considère une lame droite ainsi constituée et qu'on plonge cette lame dans un milieu dont on fait varier la température on observe que la différence de dilatation des deux métaux amène une déformation de la lame qui s'incurve de plus en plus lorsque la température augmente.

Si l'on veut faire la théorie de la bilame on considère la lame droite comme une poutre encastree à une extrémité et l'on calcule les rayons de courbure en fonction des dilatations de chacun des deux métaux. Cette théorie due à Navier-Bernouilli nous amène à

la formule d'Yvon Villarceau :

$$\frac{d}{d\theta} \frac{1}{\rho} = \frac{V}{e}$$

ρ est le rayon de courbure de la bilame droite
 e l'épaisseur de la bilame.

Le coefficient V est connu sous le nom d'Yvon Villarceau. Il est lui-même égal à :

$$V = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{(E_1 e_1^2 - E_2 e_2^2)^2}{4 e^2 E_1 e_1 E_2 e_2} \right)$$

dans lequel :

E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité des métaux,
 e_1 et e_2 les épaisseurs de ces métaux.

Pour $\frac{e_1}{e_2} = \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$, V est minimum et la déformation passe par un

$$\text{maximum } \frac{1}{e_2} - \frac{1}{e_1} = \frac{3 (\alpha' - \alpha'') (\theta_2 - \theta_1)}{2e}$$

$\alpha' - \alpha''$ différence de dilatabilité des métaux).

On voit donc finalement que la différence de rayons de courbure est d'autant plus grande que :

- 1) L'épaisseur de la lame est plus faible,
- 2) Que les coefficients de température sont plus différents.

Il suffirait donc de constituer la bilame : d'une part, par un métal très dilatable, d'autre part par de l'invar et d'en constituer une lame excessivement mince pour obtenir des déformations énormes pour la différence de température donnée.

Toutefois, nous sommes limités dans cette voie par deux objections :

1° les tensions internes qui sont dues au cisaillement entre les deux métaux augmentent très vite avec la température. Par exemple, pour une bilame constituée par de l'acier et du laiton on arrive déjà à des tensions de cisaillement de l'ordre de 5 kg. par cm^2 pour une différence de température de 50° seulement. Pour une bilame acier-aluminium la tension dépasse dans les mêmes conditions plus de 7 kg. Ces contraintes sont déjà trop élevées car il ne faut pas faire travailler les métaux trop près de leur déformation permanente sous peine de nuire à la constance de la bilame.

2° en diminuant l'épaisseur de la bilame on augmente les dangers de vibration de cette pièce, ce qui est une gêne très grande pour l'utilisation que nous avons en vue, car la bilame peut entrer en résonance avec les trépidations du bâtiment ou de la machine sur laquelle elle est fixée, ce qui pourra donner lieu à un fonctionnement intempestif de l'inter-rupteur-conduit.

D'ailleurs la constance des bilames est assez difficile à obtenir car après laminage des deux métaux la pièce est écrouie et il est nécessaire de lui faire subir un traitement thermique convenable pour la vieillir artificiellement, sinon l'écrouissage diminuerait progressivement dans le temps au plus grand détriment de la constance de l'appareil. C'est au moyen d'un étuvage prolongé de plusieurs heures à une température convenable et parfois d'oscillations de température qu'on arrive au vieillissement artificiel des bilames. Pendant cette opération, la bilame change de forme et c'est une nouvelle difficulté pour obtenir une lame d'une forme bien déterminée.

En pratique on se sert de bilames soit sous forme droite dont nous avons parlé ci-dessus,



— soit en les recourbant en U, dans ce cas les 2 branches sont rapprochées (fig. 16);

— soit sous forme de spirales se prêtant bien à l'entraînement direct d'un tube interrupteur à mercure (fig. 17).

L'effort moteur de la bilame est :

$$P = V \theta E \frac{\alpha}{8} \frac{e^2}{L}$$

On voit dans cette formule l'influence de e et de L sur cet effort moteur.

Le thermostat à bilame, très utilisé en régulation automatique, a, pour nous, l'avantage principal d'une grande simplicité, d'une masse thermique

très faible avec une surface latérale relativement grande, ce qui nous donnera par conséquent une réaction très rapide. On les constitue généralement avec un alliage de nickel, par exemple l'alliage NC4 d'Imphy à 24 % de nickel et 3 % de Cr., l'autre lame pouvant être en acier ou en aluminium. Ces métaux étant oxydables il y a lieu de les protéger soit par un vernis, soit par argenture. On a aussi utilisé des

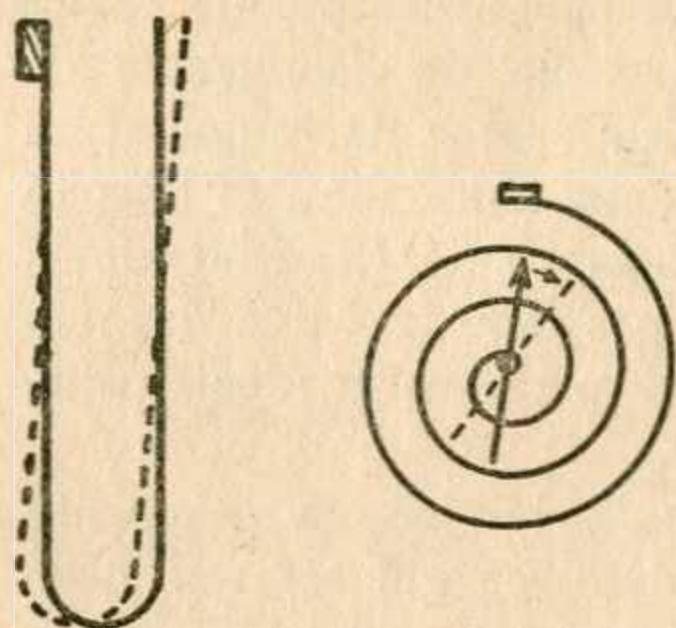


Fig. 16 et 17. — Bilames en U et en spirale.

bilames sous forme de disques à courbure préalable, la déformation donnant une flèche importante pour une différence de température très faible avec une discontinuité brusque qui est utilisée pour la conduite des interrupteurs.

Organes de liaison.

Interrupteur à rupture brusque. — Quand on utilise un thermostat sensible dont le mouvement est continu par rapport à la température, il est nécessaire d'interposer entre la partie mobile du thermostat et l'interrupteur-conduit, un organe créant une discontinuité brusque dans le mouvement de l'interrupteur afin que la fermeture et l'ouverture de cet appareil se fassent brusquement en évitant ainsi les étincelles au moment où les contacts sont très rapprochés. On arrive à créer cette



discontinuité soit par des moyens mécaniques, soit par des moyens magnétiques.

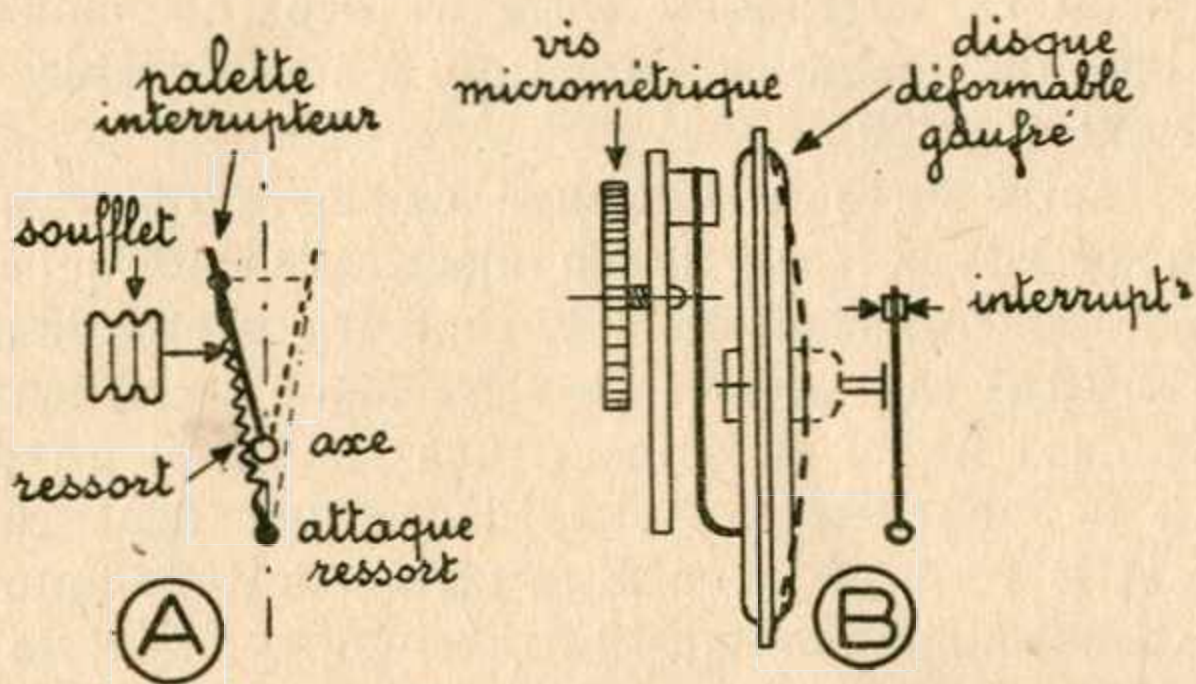


Fig. 18 et 19. — Rupture brusque mécanique.

Nous donnons ci-dessus (fig. 18 et 19) deux dispositifs mécaniques créant une discontinuité par l'action d'un ressort en équilibre instable.

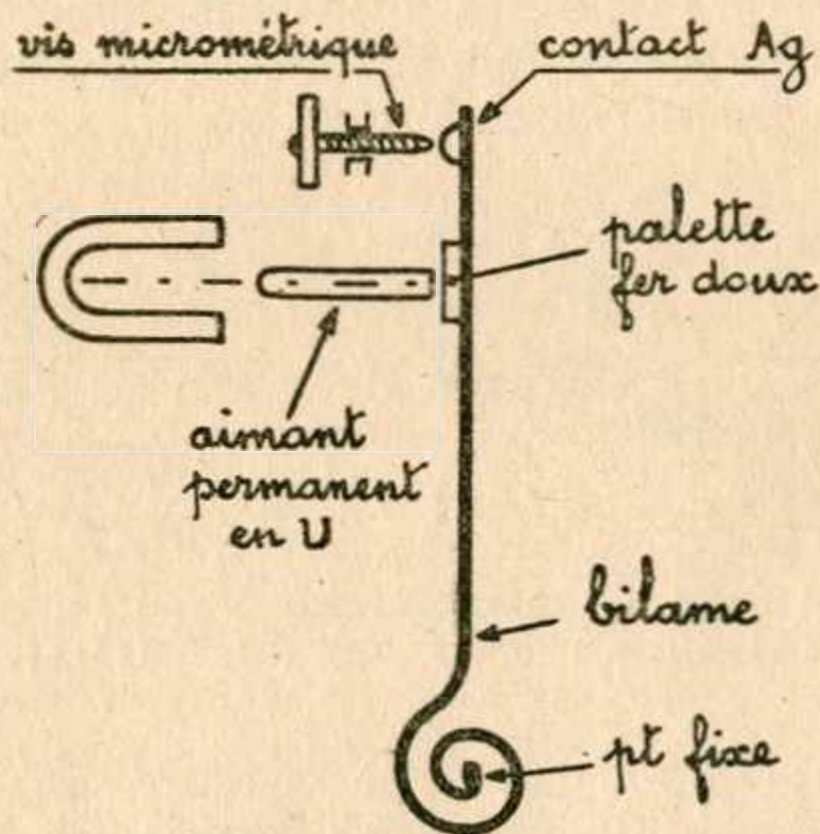


Fig. 20. — Interrupteur à rupture magnétique.

Quant au moyen magnétique, il consiste à munir l'organe mobile d'une palette en fer doux et de faire déplacer cette palette dans le champ d'un aimant permanent qui tirera brus-

quement la palette lorsqu'elle entrera dans les lignes de force de l'aimant, créant ainsi un mouvement rapide susceptible d'entraîner l'interrupteur. On évite le collage de la palette sur l'aimant en interposant entre les deux une paillette non magnétique qui maintient l'armature à une certaine distance de l'aimant (fig. 20).

Une autre méthode est aussi employée qui mérite une mention spéciale en raison de son importance en ce qui concerne nos applications. Il s'agit de l'interrupteur à goutte de mercure. Il est constitué par un tube de verre fermé à ses deux extrémités et dans lequel on a inclus une goutte de mercure ; si l'on fixe à l'une des extrémités de ce tube deux électrodes traversant le verre et qu'on fasse pivoter le tube autour d'un axe perpendiculaire aux génératrices du cylindre, la goutte de mercure se déplace d'une extrémité à l'autre pour un angle d'inclinaison très faible, réunissant ainsi les deux électrodes et établissant le contact entre elles pour un mouvement très faible et très lent du tube. On a ainsi réalisé une discontinuité puisqu'en entraînant le tube d'un mouvement uniforme on détermine le déplacement de la goutte de mercure pour un angle de déviation très faible.

Dans certains tubes, les électrodes sont noyées dans le mercure et la rupture se fait entre deux gouttes de ce métal (fig. 21 et 22).

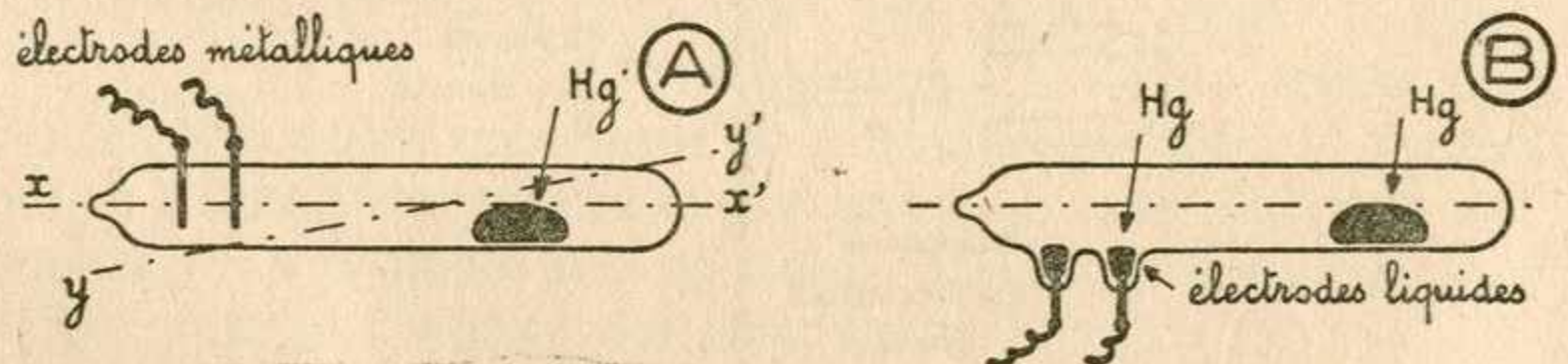


Fig. 21 et 22. — Interrupteur à goutte de Hg.

A. Goutte de Hg et électrodes métalliques. — B. Goutte de Hg et électrodes liquides.

Les interrupteurs à goutte de mercure sont très employés en régulation automatique. Ils présentent les avantages suivants :

- 1) Simplicité de fonctionnement,
- 2) Capacité de coupure relativement grande,
- 3) Aucune relation entre les électrodes et l'atmosphère extérieure, par conséquent, aucun danger d'oxydation des

électrodes, ni de propagation d'une explosion si l'atmosphère est combustible.

A ces avantages théoriques s'opposent les inconvénients suivants :

1) Grande difficulté de fabrication de ces appareils dont les qualités sont tributaires des considérations suivantes :

a) le tube de verre doit être rigoureusement cylindrique et à génératrices rectilignes, afin que la goutte de mercure descende régulièrement le long de ces génératrices sans être accrochée nulle part par une sur-épaisseur ou un étranglement du tube ;

b) il est nécessaire pour la bonne conservation de l'appareil que l'atmosphère intérieure soit rigoureusement exempte d'oxygène et de vapeur d'eau, ceci pour éviter l'oxydation des électrodes et du mercure. On est donc amené à faire un vide très poussé dans ces ampoules, d'extraire même les gaz occlus dans le verre et dans le métal des électrodes par un chauffage électronique prolongé sous vide. Puis, cette opération terminée, il est nécessaire de remplir à nouveau le tube avec un gaz inerte car l'étincelle de rupture sera d'autant mieux évitée que la pression de gaz est plus élevée. Le gaz qui a donné jusqu'à présent les meilleurs résultats est l'hydrogène rigoureusement pur et sec, qu'on peut employer sous une certaine pression dans le tube et qui s'opposera d'autant mieux au passage de l'étincelle que sa conductibilité thermique est beaucoup plus grande que celle de tous les autres gaz, ce qui lui permettra de refroidir efficacement le mercure et les électrodes par transmission de la chaleur au tube lui-même ;

c) le mercure qu'on utilise doit être rigoureusement pur afin qu'il ait la mobilité désirable et que sa surface ne contienne aucune trace d'oxyde qui gênerait le contact électrique sur les électrodes. On est donc amené à distiller plusieurs fois le mercure en atmosphère inerte car on sait avec quelle facilité le mercure s'oxyde au contact de l'oxygène.

Toutes ces précautions montrent la difficulté de fabriquer convenablement ces tubes interrupteurs dont la simplicité de fonctionnement est si grande qu'on a pu croire qu'il suffisait de prendre un tube quelconque et une goutte de mercure quelconque pour réaliser des interrupteurs à prix très bas dont les résultats en régulation automatique seraient naturellement convenables.

2) La capacité de coupure de ces appareils est d'autant plus grande que la quantité de mercure est elle-même plus grande puisque la chaleur produite par l'étincelle peut ainsi se dissiper dans une masse plus élevée. Malheureusement, cette augmentation de la quantité de mercure augmente aussi le poids de l'appareillage et exige également un tube plus large et plus lourd, donc plus difficile à faire pivoter et moins sensible. On est amené encore à augmenter la masse des électrodes et à les constituer par des métaux fins comme le platine ou le tungstène dont le coefficient de dilatation est peu différent de celui du verre afin que leur échauffement ne crée pas des tensions internes trop grandes à l'endroit où les électrodes traversent le verre, ce qui pourrait avoir pour conséquence la rupture du tube ou un passage de gaz.

Dans les tubes les plus légers et par conséquent qui peuvent être les plus précis, on obtient un mouvement de la goutte de mercure pour une valeur de pivotement pouvant être inférieure à 1° d'angle — dans ce cas la masse de mercure est faible et la capacité de coupure est généralement limitée à une intensité de 1 ampère, c'est-à-dire à 50 ou 100 w. s'il s'agit de courant alternatif de tension inférieure à 110 volts.

En courant continu, l'arc est plus difficilement étouffable et il est prudent de réduire sensiblement le courant de coupure.

On fait des tubes beaucoup plus importants dont la capacité de coupure peut atteindre plusieurs kw mais, dans ce cas, l'angle de basculement nécessaire augmente et atteint souvent une dizaine de degrés d'angle.

Certains artifices peuvent être employés dans ces tubes lourds et en particulier l'interposition entre les électrodes d'une pièce, en stéatite, évitant la formation d'un arc à la rupture. Certaines usines américaines avaient aussi construit ces dernières années des tubes métalliques rendus isolants intérieurement par vitrification ou utilisation d'une résine synthétique mais ces fabrications ne sont pas encore répandues en Europe.

Pour certaines utilisations, le tube peut être d'une forme différente du cylindre droit dont nous avons parlé mais alors les angles de basculement nécessaires augmentent beaucoup et ces tubes ne sont utilisables que pour certaines applications bien déterminées.





Appareils à discontinuité électrique. — Tous les systèmes de discontinuité mécanique ou magnétique freinent le mouvement de la bilame avant l'entraînement de l'organe mobile et accélèrent au contraire ses mouvements après que l'organe mobile a dépassé sa position d'équilibre. Cet effort appliqué tantôt dans un sens, tantôt de l'autre a pour résultat de fausser la marche régulière de la bilame ou du thermostat, ce qui est toujours un inconvénient. Pour l'éviter, on a tenté de reporter la discontinuité sur un relais n'ayant avec l'appareil de mesure aucune liaison mécanique et, par conséquent, ne pouvant en aucune manière fausser la marche de l'organe de mesure. L'un des schémas les plus connus est celui de la Minneapolis Honeywell Régulator Co qui est donné ci-après (fig. 23). On voit

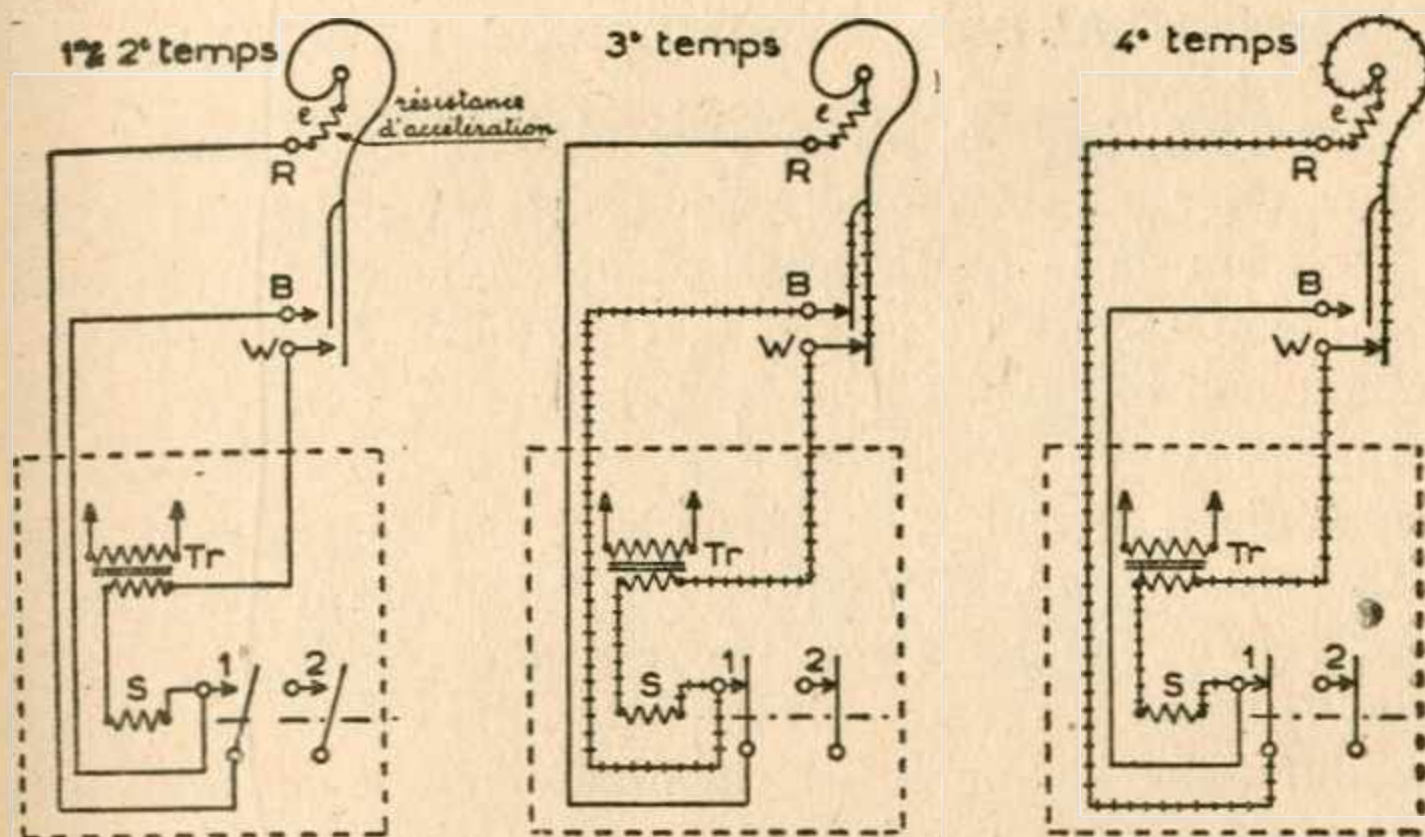


Fig. 23. — Fonctionnement du thermostat accéléré M. H. C.

- 1^{er} temps : thermostat satisfait, contacts ouverts, relais déclenché — [appareil chauffant arrêté.
- 2^e temps : la température extérieure baisse, la bilame ébauche son mouvement vers la gauche, le contact W se ferme, mais rien ne se passe.
- 3^e temps : la température baisse encore, la bilame continue son mouvement, le contact B se ferme, le relais est attiré, le chauffage commence.
- 4^e temps : la température monte, la bilame s'écarte vers la droite, le contact B s'ouvre, le relais reste enclenché, mais la résistance chauffante ρ est en circuit, ce qui active le mouvement de la bilame.
- 5^e temps : la bilame s'écarte à droite, sous l'action combinée de l'échauffement ambiant et de la résistance ρ , le contact W s'ouvre et le relais tombe. Nous revenons au 1^{er} temps.

qu'il est basé sur la coupure successive de deux contacts : celui de la fermeture du relais n'étant pas celui qui commande l'ouverture, grâce au circuit de maintien qui est prévu dans

le relais. On suivra le fonctionnement de cet appareil sur le schéma et l'on constatera que, finalement, on a reporté sur le relais la discontinuité qui est nécessaire à la bonne marche dans l'installation : le relais se fermant aussitôt que le deuxième contact s'est établi, même pendant une fraction de seconde, le relais restant énergiquement collé tant que le premier contact n'est pas rompu. On a ainsi supprimé les dangers de vibrations de la bilame, ces vibrations n'étant pas transmises au relais. On a aussi créé une zone neutre comprise entre les deux points d'enclenchement successifs des deux contacts, cette zone pouvant d'ailleurs être plus ou moins large suivant les besoins de l'installation puisqu'il est facile de régler l'écart entre les deux coupures au moyen de la vis micrométrique.

THERMOSTATS A RÉSISTANCE ELECTRIQUE.

Quoique peu utilisé en régulation automatique, nous devons citer les thermomètres à résistance qui sont basés sur la variation de la résistance électrique d'un métal en fonction de la température de ce métal. On choisit naturellement des métaux non oxydables à la température où l'on veut faire la mesure et dont le coefficient de variation de la résistance soit suffisamment grand (par exemple : platine pouvant déceler le 1/500 de degré). On transforme ainsi la variation de température en une variation de résistance électrique qu'il est facile de mesurer par un galvanomètre. Si l'on a à sa disposition une différence de potentiel rigoureusement constante on sait qu'il passera dans la résistance variable, un courant qui sera inversement proportionnel à la résistance du circuit et par conséquent, les indications du galvanomètre suivront constamment les variations de la résistance, donc de la température. Comme cette constance de la f.é.m. est difficile à obtenir pratiquement, on utilise de préférence la méthode du O en employant un pont de Wheatstone ou des schémas équivalents.

On trouvera ci-après (fig. 24) la disposition normale du pont de Wheatstone dans lequel 4 résistances a , b , a' , b' , disposées suivant les 4 côtés d'un losange. Si, aux 2 sommets A-B sont reliées les bornes d'une source de courant et qu'aux 2 autres sommets C-D on place un galvanomètre sensible, on démontre en électro-technique qu'il ne passe aucun courant

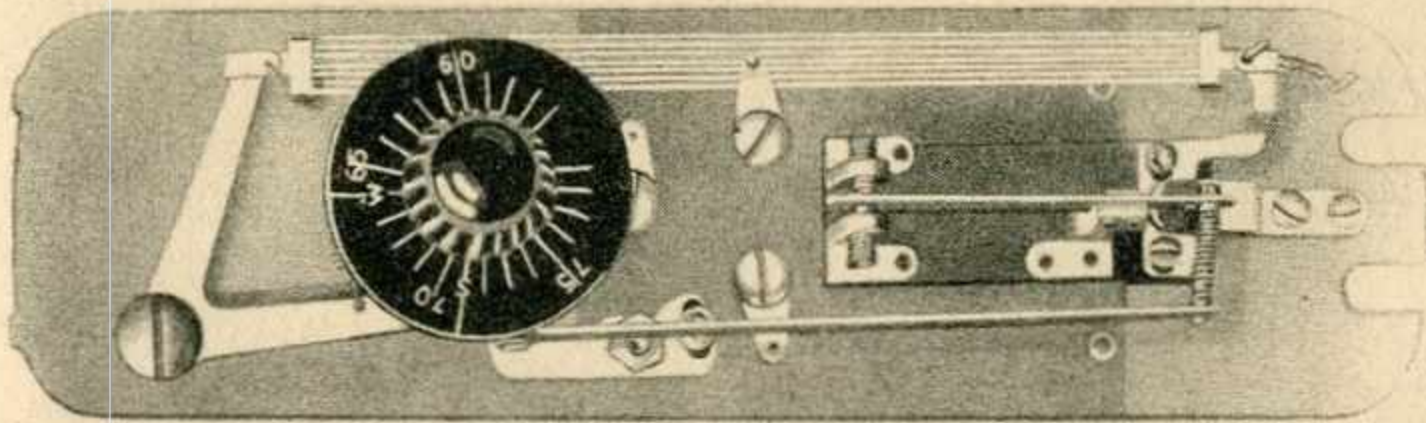


Fig. 31. — Confortrol Friez.

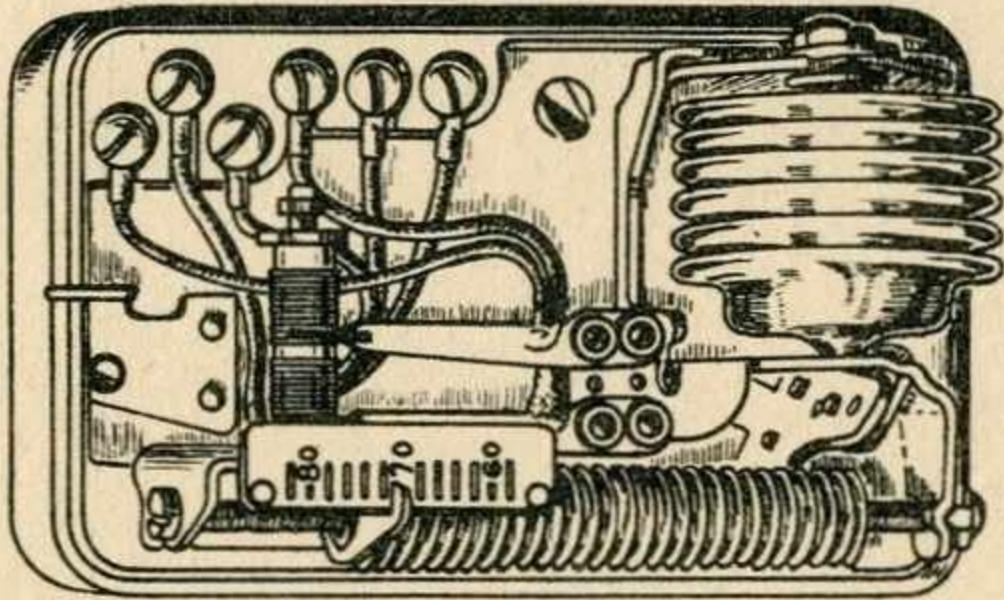


Fig. 28. — Thermostat potentiométrique.

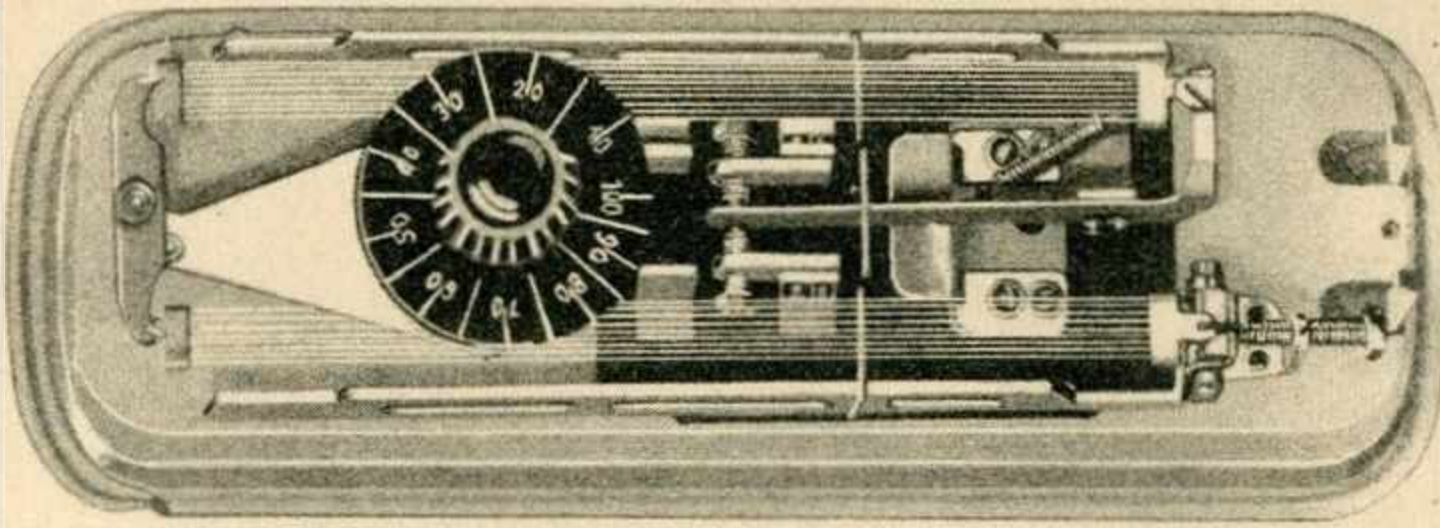


Fig. 39. — Humidostat.



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

dans le galvanomètre qui reste, par conséquent au 0, lorsque

$\frac{a'}{a} = \frac{b'}{b}$. Par conséquent, si b est la résistance variable en relation

avec la température à mesurer, si b' est un rhéostat réglable tandis que a et a' sont des résistances fixes connues, pour que l'équilibre soit établi et que le galvanomètre revienne

au 0 il faut que $b' = b \times \frac{a'}{a}$.

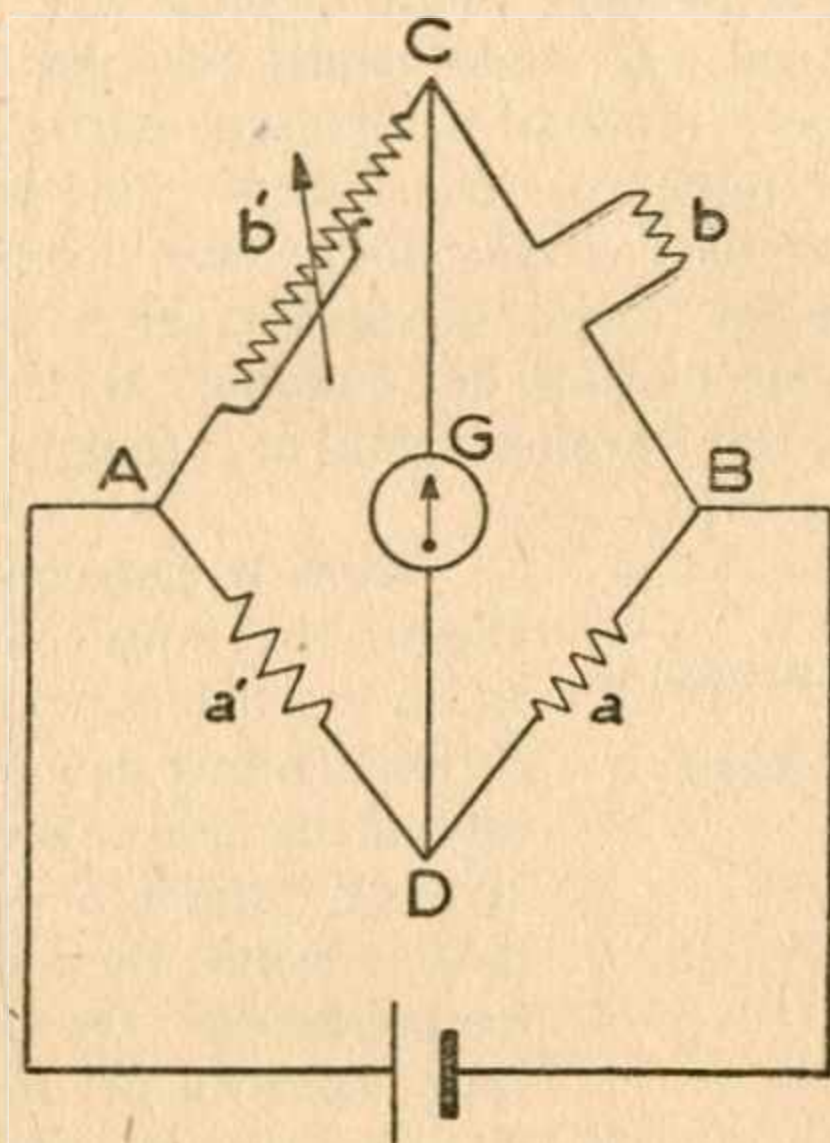


Fig. 24. — Pont de Wheatstone.

Il suffira donc de faire varier la position du curseur du rhéostat b pour que cette condition soit satisfaite et on pourra graduer le rhéostat en température si l'on connaît la loi qui lie la résistance de b en fonction de la température à laquelle elle est soumise. On voit que cette méthode, très employée pour la mesure des températures, est peu utilisable en régulation automatique puisqu'il faut une intervention manuelle pour faire varier le rhéostat ; néanmoins, on aura fréquemment l'occasion d'utiliser cette méthode dans les mesures de précision. En général, on utilisera un fil en nickel bobiné sur un isolant à base de mica et l'on soumettra cette résistance à la



température à mesurer. On peut obtenir ainsi une précision aussi bonne que l'on désire avec une inertie thermique très faible.

THERMOSTATS A COUPLE THERMO-ÉLECTRIQUE.

On connaît le phénomène de Peltier, qui a observé que si un circuit électrique est constitué par deux métaux différents réunis ensemble par soudure, le courant passe de la soudure chaude à la soudure froide lorsqu'il y a une différence de température entre les deux points. Ce phénomène est d'ailleurs réversible et s'il n'était pas masqué par le phénomène de Joule on observerait un refroidissement d'une des soudures et un échauffement de l'autre soudure lorsqu'on fait passer un courant continu au travers du conducteur de Peltier. Il y a là possibilité pour l'avenir de produire directement du froid sans passer par la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique (fig. 25).

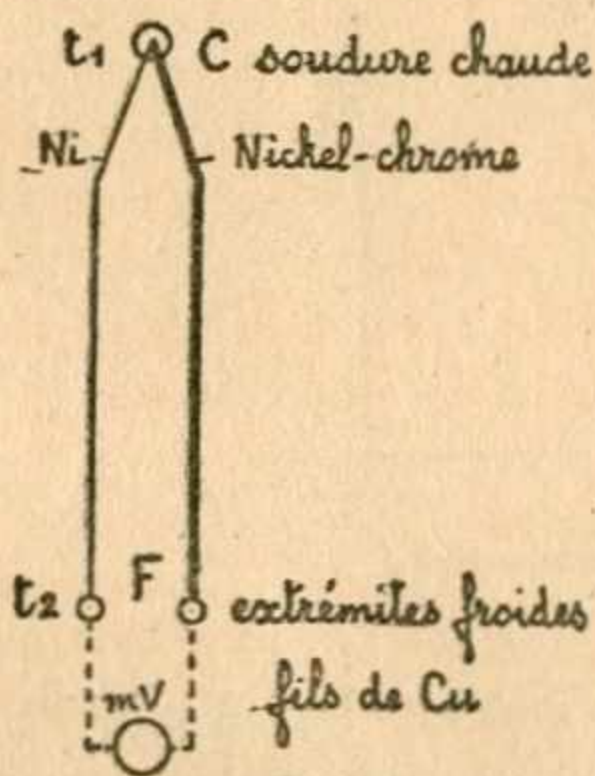


Fig. 25. — Couple thermo-électrique (effet Peltier).

Dans le phénomène du couple thermo-électrique on observe des f.é.m. très faibles pour une variation de température donnée, cette f.é.m. est par exemple de 5 millivolts pour 100° de différence de température dans le couple thermo-électrique en fer constantan. On choisit les métaux constituant les couples de manière à avoir une f.é.m. assez grande pour qu'elle soit mesurable et aussi de manière à ce que les métaux ne soient pas attaqués à la température de l'expérience. Pour que le galvanomètre mesurant la f.é.m. puisse être gradué directement en degré de température, il

est nécessaire que l'une des soudures soit maintenue à une température rigoureusement constante. Cette condition obligerait à plonger l'une des soudures dans de la glace fondante par exemple afin de la maintenir constamment à 0° ; ce dispositif n'est utilisé que pour les appareils de laboratoires car il nécessite l'emploi d'un vase rempli de glace fondante re-

nouvelée au fur et à mesure de la fusion. Il n'est d'ailleurs rigoureusement exact que tant que la glace est véritablement fondante et l'on sait que la glace qu'on retire des mouleaux d'une fabrique de glace est généralement à plusieurs degrés au-dessous de 0°.

Dans les appareils industriels on élimine la sujétion du bac à glace au moyen d'un dispositif électro-thermique qui compense la température de la soudure à température fixe. Ce dispositif de compensation varie suivant les appareils mais est basé en général sur la variation de résistance électrique du métal en fonction de sa température.

Les appareils à couple thermo-électrique sont surtout utilisables pour les températures élevées, ils ne sont donc pas indiqués dans l'industrie frigorifique ; ils ne seront en tout cas utilisables que pour les mesures de précision et dans ce cas il faudra toujours se méfier un peu du système de compensation, toute la précision du système reposant en fin de compte sur sa valeur.

D'une manière générale, les thermomètres électriques ont l'avantage de pouvoir être composés d'un élément sensible relié par fils à l'organe de mesure pouvant se placer à une grande distance de l'organe sensible, en tenant compte naturellement de la résistance des fils de liaison ainsi que du coefficient de température de ces fils du moins pour les thermomètres à résistance. L'élément sensible constitué d'un fil fin, a peu d'inertie thermique ; sa réaction est donc rapide.

THERMOSTATS PNEUMATIQUES.

Jusqu'à présent, nous avons supposé que l'organe thermométrique actionnait un interrupteur électrique et c'est en effet, dans nos industries, le cas le plus général. Toutefois, il est utilisé également des thermostats pneumatiques dans lesquels l'organe sensible thermométrique fait varier la valeur d'une fuite créée dans un conduit d'air comprimé. Dans le schéma de la figure 26 ci-après, on voit que l'organe thermométrique représenté schématiquement par une bilame se présente plus ou moins près d'un ajutage créant une fuite d'air comprimé, cette fuite étant naturellement d'autant plus grande que la palette mobile découvre davantage l'ajutage. Si l'air est comprimé à une pression constante, par exemple 1 kg. par cm²,

la fuite crée dans la tuyauterie une perte de charge d'autant plus grande que le débit de cette fuite est plus grand et si l'on mesure la pression de l'air au voisinage de la fuite on constate que la pression est d'autant plus rapprochée de la pression

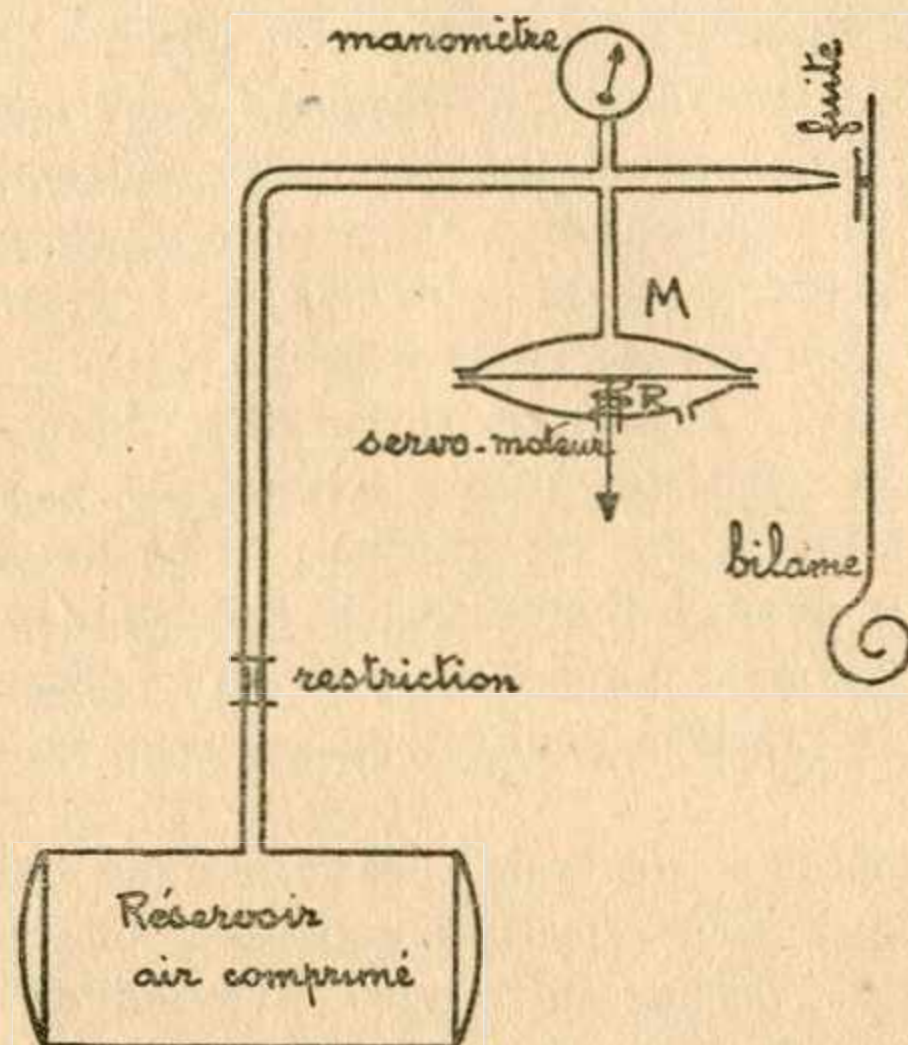


Fig. 26. — Principe du thermostat pneumatique.

atmosphérique que la fuite est plus grande. On peut se servir de cette chute de pression pour actionner n'importe quel organe de commande et, par exemple, on s'en sert pour actionner une vanne au moyen d'un servo-moteur pneumatique représenté schématiquement en M sur la figure ci-dessus et dont nous parlerons en détail quand nous étudierons les servo-moteurs. Lorsque la pression diminue dans la conduite, la membrane du servo-moteur est déprimée par le ressort R et entraîne la vanne à l'une des extrémités de sa course, lorsque au contraire la pression se rapproche de celle du réservoir alimentant la conduite, la pression comprime le ressort et la vanne se trouve entraînée à l'autre extrémité de sa course. On voit immédiatement que l'un des avantages principaux de ce système pneumatique est sa progressivité, la vanne représentée à la figure suivant pas à pas les variations de position de la palette mobile du thermostat. Au contraire, dans les thermostats à interrupteurs électriques, nous n'avons à notre disposition

que deux positions, contact fermé, contact ouvert, ne nous donnant la possibilité que de commander l'ouverture ou la fermeture d'une vanne.

Les appareils pneumatiques seront donc préférés lorsqu'on voudra obtenir facilement le réglage proportionnel d'une valeur comme c'est le cas, par exemple, en conditionnement de l'air ; par contre, il exige un générateur d'air comprimé à pression constante et si l'on n'a pas la possibilité de se brancher sur une distribution d'air comprimé existante, on sera obligé de prévoir un groupe compresseur, ce qui augmente très sensiblement le prix de revient de l'installation. Cette objection n'est d'ailleurs valable que si l'on a un seul appareil pneumatique à installer car si l'on a à prévoir un assez grand nombre d'appareils pneumatiques le prix du groupe compresseur étant supporté par un plus grand nombre d'appareils, la majoration de prix devient insensible et peut même changer de sens car les appareils de commande pneumatiques

sont généralement moins coûteux que les appareils électriques.

Les appareils pneumatiques se prêtent aussi plus facilement que les appareils électriques à l'asservissement et à la compensation, nous verrons plus loin ce qu'il faut entendre par ces deux expressions et comment on peut se servir des appareils pneumatiques pour obtenir facilement une régulation isotherme qu'il serait plus difficile de réaliser avec des appareils électriques.

THERMOSTATS POTENTIOMÉTRIQUES. (fig. 27 ci-dessus et 28 en hors-texte)

Pour obtenir une régulation proportionnelle au moyen d'appareils électriques il faut que l'organe de mesure entraîne, non un interrupteur, mais un rhéostat variable — il est facile de concevoir que le bilame ou le soufflet déformable d'un ther-

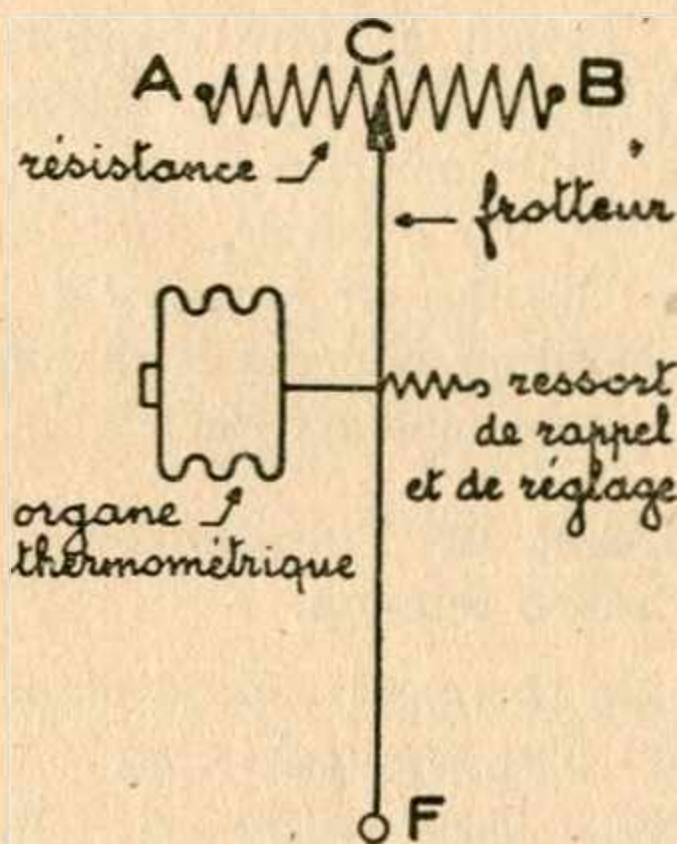


Fig. 27. — Thermostat potentiométrique.



mostat puisse entraîner une aiguille se déplaçant sur une résistance bobinée, à condition naturellement que le courant traversant ce système soit d'une puissance très réduite, sous une force é.m. également réduite, afin que la pression de contact ne viennent pas fausser le fonctionnement du thermostat. Nous aurons donc l'obligation d'alimenter ces appareils en courant à basse tension (généralement 24 volts) et d'avoir recours à un relais afin que la puissance transmise ne dépasse pas quelques watts.

Ayant à notre disposition cet appareil à rhéostat ou à potentiomètre nous pourrons nous en servir pour commander par l'intermédiaire d'un relais la marche proportionnelle d'une vanne, par exemple, dont le mouvement suivra le mouvement de l'aiguille sur le rhéostat. Différents dispositifs sont à notre disposition, nous les étudierons en détail lorsque nous étudierons les servo-moteurs électriques.

Intérêt de l'alimentation des thermostats en courant basse tension.

Un thermostat étant d'autant plus sensible que ses contacts sont plus rapprochés, on a intérêt à les alimenter avec un courant à basse tension et à interposer un relais dont la bobine soit à haute résistance. Aux Etats-Unis, on choisit le voltage normalisé de 24 volts, ce courant étant produit par un petit transformateur statique 110/24 ou 220/24 V faisant souvent partie du relais.

Ce dispositif permet aussi d'isoler complètement le circuit de régulation du réseau électrique et même de faire le retour de courant par la masse ce qui serait impossible avec le courant direct du secteur. Les fils peuvent aussi être de simples câbles téléphoniques sous plomb ou sous coton paraffiné plus faciles à poser et moins coûteux que les fils lumière à haut isolement.

Quand on accepte l'usage de cette basse tension, on en profite pour alimenter toutes les vannes et appareils de sécurité en 24 v, ce qui simplifie leur bobinage et les rend plus robustes, puisque les fils sont plus gros.

THERMOSTAT A FONCTIONNEMENT ACCÉLÉRÉ.

Malgré toutes les précautions, l'inertie thermique des thermostats est toujours appréciable. D'une part, la masse des

appareils sensibles est toujours assez grande par rapport à la surface de contact avec le fluide dont on mesure la température. Comme cette différence de température entre fluide et organe sensible tend vers 0, il faut s'attendre à un mouvement extrêmement lent et à des retards relativement considérables. D'autre part, le mouvement de l'air ou du fluide est généralement gêné aux environs de l'organe sensible ce qui ajoute un nouveau retard au fonctionnement de l'appareil.

Enfin, il ne faut pas oublier que le thermostat lui-même n'est qu'une partie de l'installation de chauffage ou de refroidissement. Si nous prenons l'exemple d'une chambre refroidie par une batterie à saumure et que notre thermostat agisse sur la production de froid dans le bac producteur de saumure, nous allons avoir une cascade de phénomènes ayant tous un retard par rapport au précédent : au moment où le thermostat annonce que la température de la salle est un peu trop élevée, il s'est déjà passé quelques minutes puisqu'il a fallu que l'organe sensible du thermostat absorbe une certaine quantité de calories pour se mettre lui-même à la température de l'air. Au moment où le thermostat fonctionne, il agit sur l'appareil commandant la mise en fonctionnement de la machine frigorifique ou augmente la production frigorifique si nous avons affaire à un système à réglage proportionnel. Cet ordre n'est pas exécuté instantanément. Si la machine frigorifique doit se mettre en marche, il s'écoulera un certain temps entre le moment où le moteur commence à tourner et celui où l'évaporateur se refroidit. Il faudra également un certain temps pour que le froid produit à l'intérieur des tubes de l'évaporateur se transmette à la saumure. Enfin, il faudra également du temps pour que toute la masse de saumure soit à la bonne température et enfin pour que cette saumure parvienne à la surface refroidissante dans la salle contrôlée après un mouvement plus ou moins rapide dans les tuyauteries d'amenée. Également, il faudra un certain temps pour que l'air de la salle cède sa chaleur à la batterie froide et que, pour toute la masse d'air, se mette en équilibre.

Pendant tout ce temps les influences extérieures qui agissaient pour augmenter la température de la salle continuent à s'exercer et par conséquent, malgré que le thermostat ait fonctionné depuis déjà plusieurs minutes dans le sens du refroidissement, la température de l'air aura continué à s'élever régu-

lièrement comme si le thermostat n'avait pas fonctionné.

Il n'est pas rare de trouver un thermostat fonctionnant très convenablement avec un écart ne dépassant pas 1° par exemple et avec lequel on a toutes les peines du monde à obtenir un réglage de la température de la salle avec une précision supérieure à 3 ou 4°. Comme on le voit il ne s'agit pas d'un défaut du thermostat mais d'un défaut de l'installation générale.

Pour éviter, en partie au moins, ces retards successifs il serait nécessaire que le thermostat fonctionne avant que son équilibre thermique ait été atteint, aussi bien du côté de l'ouverture que du côté de la fermeture. On a imaginé d'obtenir un différentiel-apparent diminué ainsi dans de grandes proportions, au moyen de l'artifice suivant : lorsque le thermostat commence à s'échauffer on peut augmenter artificiellement la vitesse de cet échauffement en faisant agir sur l'organe sensible une résistance électrique très faible (de l'ordre de 1 ou 2 watts) dont l'action s'ajoute à celle du fluide ambiant. Nous obtenons donc ainsi le fonctionnement du thermostat un peu plus tôt que si nous ne l'avions pas chauffé artificiellement. Au moment du refroidissement, la résistance sera naturellement coupée et le thermostat se refroidira assez vite puisque sa température propre sera à ce moment un peu plus élevée que celle du fluide, ce qui assurera un échange thermique meilleur. En graduant l'action progressive de cette résistance on arrive à obtenir un différentiel apparent très faible même avec un appareil dont le différentiel vrai était assez grand. C'est un procédé qui est très employé en régulation automatique du chauffage et qui pourrait l'être également dans l'industrie frigorifique. Toutefois, dans ce dernier cas, le contact étant établi lorsque la température ambiante croît, il faut au contraire que la résistance additionnelle soit alimentée à contretemps.

La résistance chauffante se place soit en série avec l'appareil d'utilisation, soit en parallèle avec elle. Les deux dispositifs ont leurs avantages et leurs inconvénients propres (fig. 29 et 30).

Avec le premier dispositif on est obligé de tenir compte de la puissance absorbée par l'appareil d'utilisation pour calculer la résistance chauffante suivant l'ampérage qui la traverse. Par conséquent cette résistance ne pourra servir que pour un seul appareil d'utilisation avec lequel elle sera accordée. Si le thermostat commande une vanne électro-magnétique ou un relais

dont le bobinage est bien connu, cela ne présentera pas d'inconvénient, mais il faudra se rappeler que la résistance doit être changée si l'appareil d'utilisation est lui-même changé.

Dans le dispositif en parallèle au contraire, le courant qui traverse la résistance n'est fonction que du voltage du réseau. La quantité de chaleur développée est donc constante par unité de temps quel que soit l'appareil commandé. On peut même

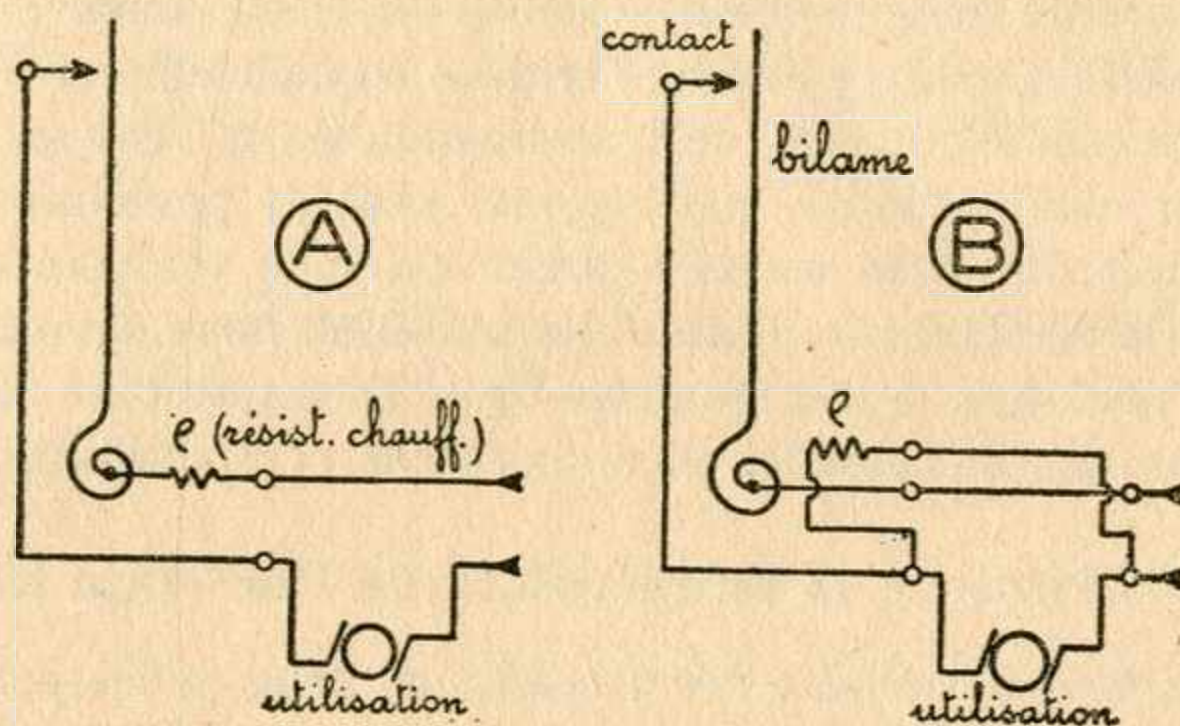


Fig. 29 et 30. — Thermostat accéléré.

A. Résistance en série avec l'organe d'utilisation. — B. Résistance en dérivation.

prévoir un dispositif de réglage de cette puissance développée si la résistance chauffante est construite comme un rhéostat dont la palette de prise de courant est mobile. Par contre, ces résistances en parallèle devant être branchées sur le voltage total de la distribution de courant, sont très difficiles à construire puisqu'une résistance devant absorber 1 ou 2 watts sous 110 volts doit avoir une résistance de $1/100$ d'ohm ce qui conduit à employer des fils extrêmement fins et par conséquent fragiles. Ce 2^e dispositif oblige également à amener au thermostat les deux fils de la distribution tandis que généralement on n'en amène qu'un, ce qui est une complication. Pour toutes ces raisons on préfère généralement le dispositif en série.

Dans le montage Minneapolis de la fig. 23, on voit que la résistance additionnelle n'est en circuit que dans la plage d'insensibilité du thermostat, qui marche alors sans accélération en dehors de cette plage.

DISCUSSIONS

SUR LA VALEUR DES INDICATIONS DU THERMOMÈTRE

Il y a lieu de réfléchir un instant à la valeur des indications d'un thermomètre suivant la position de cet appareil dans le local dont on désire prendre la température. Cette discussion est valable pour les thermostats dont l'organe sensible est également un thermomètre.

Thermomètres ou thermostats réagissent suivant la température propre de leur partie sensible. Or, cette partie sensible se met en équilibre avec l'ambiance dans laquelle elle est plongée par les moyens ordinaires de transmission de la chaleur, c'est-à-dire par conductibilité, par rayonnement et par convection.

Suivant que nous avons à prendre soit la température de l'air, soit la température d'un objet matériel, nous devons nous arranger pour que le thermomètre ou le thermostat ne soit pas faussé par les phénomènes secondaires de conductibilité.

1^{er} cas. — Prise de la température de l'air d'un local.

Nous devons prendre des précautions dans ce cas pour que le thermomètre ne prenne pas, par conductibilité, la température de la paroi contre laquelle il est posé, cette paroi pouvant être à une température différente de celle de l'air. Pour éviter cette transmission de chaleur par contact, nous devons écarter nos appareils de mesure ou de régulation des parois et interposer entre l'organe sensible et cette paroi une plaque isolante.

Nous avons déjà dit qu'il était nécessaire que l'organe sensible se trouve à plusieurs cm. de la paroi pour ne pas se trouver dans le film d'air au repos dont le gradient de température est assez grand, ce qui nous amènerait à prendre une température intermédiaire entre celle de la paroi et celle de l'air que nous désirons mesurer.

Nous devons également protéger notre appareil de mesure contre le rayonnement et par conséquent ne pas poser notre thermostat ou notre thermomètre à proximité de surfaces refroidissantes ou de surfaces chauffantes dont l'effet se ferait sentir sur le thermomètre. On sait que cette influence est proportionnelle à l'angle solide sous lequel on voit la surface lorsqu'on l'observe de la place du thermomètre. D'autre part, on doit rendre l'organe sensible aussi peu absorbant que possible

à la chaleur rayonnante et dans cet ordre d'idées on a avantage à protéger l'organe sensible par une surface métallique brillante ou par une gaine antirayonnante. On peut également avoir intérêt à ventiler légèrement le thermomètre ou le thermostat afin d'augmenter les échanges calorifiques de l'organe sensible, ce qui aurait pour double conséquence d'augmenter sa vitesse de réaction et de diminuer proportionnellement l'influence des phénomènes parasites de conduction par contact et par rayonnement.

On sait que pour mesurer rapidement la température de l'air, le meilleur moyen est encore de se servir du thermomètre fronde qui élimine à peu près tous les phénomènes parasites. Bien entendu, l'organe sensible thermométrique ne doit pas pouvoir recevoir de traces d'humidité sinon il deviendrait plus ou moins un thermomètre humide dont la température d'équilibre est comme l'on sait fonction du degré hygrométrique de l'air.

2^e cas. — Mesure de la température d'un corps solide.

Le meilleur moyen à employer consiste à plonger le thermomètre dans une cavité percée dans le corps lui-même. C'est ainsi qu'on procède pour mesurer la température d'une paroi en prenant la précaution que l'organe sensible soit enfoncé peu profondément afin de prendre la température superficielle de cette paroi, la seule qui nous intéresse généralement puisqu'elle conditionne le rayonnement de cette paroi.

Si l'on ne peut pas percer une cavité dans le corps dont on veut mesurer la température on est obligé de l'appliquer contre la surface du corps et de protéger l'organe sensible contre les effets du rayonnement extérieur et de la convection. On réussit généralement assez bien avec un organe sensible de grande surface appliqué avec force contre la paroi et protégé par une couche isolante d'ouate ou de soie de verre. Cependant il faut se méfier que cette surface isolante peut modifier la température du corps en diminuant les échanges sur la portion correspondante de la surface.

Si le corps est de petit volume, il faut également prendre garde que l'application du thermomètre sur le corps ne modifie pas sensiblement la température de ce dernier et si c'était le cas, on serait obligé d'employer des organes sensibles extrê-

mement légers tels que les fils de thermomètres électriques à résistance, ou composant un couple de Peltier.

3^e cas. — Mesure d'une température de rayonnement.

Quand on veut augmenter la transmission par rayonnement du thermomètre aux dépens des 2 autres modes de transmission de la chaleur, on est amené à mettre l'organe sensible au centre d'une ampoule perméable aux infra-rouges de rayonnement thermiques et dans laquelle on fait le vide pour éviter la transmission par convection.

En noircissant l'organe sensible on le rend très absorbant aux rayons infra-rouges et l'on mesure ainsi de préférence la température de rayonnement de l'ambiance.

Il y a lieu dans ce cas d'éviter la transmission par contact au travers du support traversant l'ampoule vide en diminuant la section de ce support et en le constituant avec un matériau isolant (caoutchouc-mousse).

4^e cas. — Mesure d'une température résultante.

En conditionnement d'air des locaux habités, on essaie d'obtenir un thermomètre ou un thermostat donnant, non pas une température absolue, mais permettant de repérer les réactions physiologiques des individus qui sont appelés à séjourner dans l'ambiance conditionnée. Or, les travaux des physiologistes américains ainsi que ceux des thermiciens français Dupuy et Missenard ont montré que le confort thermique de l'homme dépend :

- 1) De la température sèche de l'air dans lequel il est baigné.
- 2) Du degré hygrométrique de cet air (c'est-à-dire de la température humide de l'air considéré).
- 3) De la vitesse de l'air au voisinage de l'individu.
- 4) De la température des parois limitant l'enceinte conditionnée.

Tout ceci, bien entendu, pour un individu déterminé à un moment déterminé. En effet, l'homme est plus ou moins sensible au froid suivant certaines caractéristiques physiologiques : âge, sexe, alimentation, proximité d'un repas, état de santé ; sans compter bien entendu deux facteurs de première impor-



tance : le degré d'activité, le mode de vêtue et la valeur calorifique des vêtements.

Ceci nous amène à rechercher la possibilité de mesurer la température résultante qui tiendrait compte de tous les facteurs physiques ci-dessus (à l'exclusion des facteurs physiologiques, dont nous ne sommes pas maîtres). L'idéal serait de trouver un thermomètre ou un thermostat dont la graduation donnerait directement une idée de la valeur du confort de l'ambiance.

Différents appareils ont été préconisés, notamment par M. Missenard qui a proposé un thermomètre résultant constitué par un thermomètre à mercure dont le bulbe est placé au centre d'une sphère de 10 cm. de diamètre environ, à parois noircies. Cet appareil tient donc compte à la fois de la température de l'air et de la température de rayonnement des parois. Ceci est très important puisque les expériences citées ci-dessus ont démontré que l'homme normalement habillé perd environ 80 calories par heure dans une ambiance à 18° (homme au repos ou en faible activité) et que sur ces 80 calories, 60 sont perdues par rayonnement vers les parois et seulement une vingtaine par convection et par évaporation pulmonaire.

Le thermomètre résultant Missenard est donc déjà un perfectionnement sur le thermomètre ordinaire à condition qu'il soit placé au même endroit que l'occupant dans la pièce considérée et en tenant compte de la lenteur de réaction de cet appareil en raison du double phénomène de convection intérieure et extérieure à l'ampoule qui vient retarder les échanges.

Malheureusement le thermostat Missenard ne tient pas compte de l'état hygrométrique de l'air ce qu'on pourrait évidemment obtenir en faisant ruisseler une petite quantité d'eau sur l'ampoule extérieure. Il ne tient pas compte non plus de l'effet de ventilation c'est-à-dire de la vitesse de l'air à proximité de l'occupant et il ne serait possible de tenir compte de cet effet de ventilation qu'au moyen d'un thermomètre chauffé artificiellement dont la perte en calorie serait alors fonction de la vitesse de l'air.

La compensation des effets d'hygrométrie sur la température résultante a été résolue mécaniquement par l'appareil de la maison Friez, de Baltimore, spécialiste des instruments météorologiques. Un hygromètre à cheveux modifie le réglage d'un thermostat à bilame par l'intermédiaire d'une came dont le profil reproduit la loi expérimentale dans la limite des tem-

pératures couvertes par ce thermostat. (fig. 31 en hors-texte.)

Dans les installations de conditionnement d'air, où la compensation est obligatoire, on fait agir en parallèle un thermostat et un humidostat modulants dont les actions se conjuguent pour traduire en résistance électrique la valeur de la température résultante. On peut également, avec le même montage électrique, « mélanger » les indications pondérées d'un thermomètre sec et d'un thermomètre humide. Dans ces deux cas, le mélange se faisant suivant une loi linéaire, le résultat n'est acceptable qu'autant qu'on peut assimiler la courbe psychrométrique à une droite, c'est-à-dire dans une zone de fonctionnement de quelques degrés, ce qui est suffisant en pratique.

Nous avons nous-mêmes proposé pour la mesure de la température résultante l'emploi de trois thermomètres : le 1^{er} serait un thermomètre ventilé et protégé contre le rayonnement par un tube de métal poli, il mesurerait par conséquent la température de l'air, le 2^e à élément sensible noirci ne prendrait guère que la température de rayonnement des parois et pourrait même se placer au centre d'une ampoule vide d'air pour supprimer les effets de convection. Enfin, le 3^e serait un thermomètre humide donnant par conséquent, la mesure de l'état hygrométrique de l'air.

S'il s'agissait de thermomètres électriques, il serait facile de « mélanger » les indications de ces trois appareils suivant une formule trinome comprenant trois coefficients, la résistance électrique du circuit mesurant ainsi la température résultante. Si l'on voulait tenir compte de la vitesse de l'air, il faudrait faire intervenir un 4^e thermomètre contenu dans une enceinte chauffée par une résistance électrique fixe et dont le refroidissement serait fonction de la vitesse de renouvellement d'air autour de cette enceinte.

A la vérité, on n'a généralement pas besoin de tenir compte de ce 4^e facteur puisqu'en conditionnement des locaux habités on s'efforce généralement d'avoir un air calme ou très faiblement agité, l'influence de ce léger mouvement étant insensible sur la température résultante.

Nous verrons plus loin que ce système de mélange électrique est facilement réalisable au moyen des thermostats à potentiomètres ou des thermostats à résistances.

REMARQUES

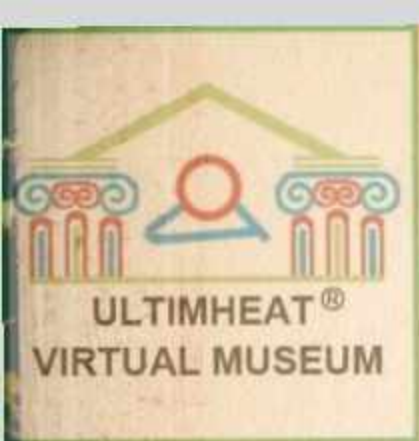
La valeur des indications d'un thermomètre ou d'un thermostat dépend donc beaucoup de la position de cet appareil dans le local considéré. Ses indications varient suivant l'influence du rayonnement (proximité d'une surface froide ou d'un vitrage extérieur) mais elles dépendent aussi, en ce qui concerne la convection, de la hauteur de l'appareil au-dessus du sol. En effet, l'air d'un local s'échauffe au contact de surfaces chauffantes et tend à s'élever vers le plafond puis se refroidit au contact du plafond, des parois et du sol pour revenir à la surface chauffante après un long mouvement de rotation ; de même l'air se refroidit au contact d'une batterie froide, tombe vers le sol, se réchauffe au contact du sol et des parois et revient par une rotation inverse à la batterie froide. C'est d'ailleurs pourquoi il est logique de placer une batterie chaude le plus près possible du sol, et une batterie froide le plus près possible du plafond.

On conçoit qu'à cause de ces mouvements de convection on trouve toujours une température plus élevée au plafond qu'au sol et que, d'autre part, lorsque les mouvements de convection sont très faibles, on observe une véritable stratification par couches de l'air de la pièce, les couches élevées plus chaudes n'ayant aucune tendance à se mélanger avec les couches inférieures plus froides.

Suivant donc, que nous placerons notre thermomètre plus ou moins haut par rapport au sol, nous trouverons des indications assez différentes : il est fréquent d'observer des différences de température de plusieurs degrés entre les couches inférieures au sol et les couches supérieures au plafond.

Comme on désire généralement mesurer la température moyenne de la pièce. Il faut donc placer le thermostat soit au centre du local, ce qui est généralement difficile (par exemple sur une colonne centrale s'il en existe une) ou le long d'une paroi mais à une hauteur moyenne par rapport au plancher.

S'il s'agit d'un local habité, on place généralement le thermomètre ou le thermostat à la hauteur des yeux des occupants c'est-à-dire en moyenne à 1 m. 50 du sol. Il est important aussi de ne pas placer les appareils thermométriques de mesure ou de régulation à proximité des portes ou de fenêtres ouvrantes, ce qui aurait pour résultat de fausser la mesure à chaque ouverture et même parfois, dans les locaux froids, dans lesquels une



condensation de l'air extérieur est à craindre, de transformer le thermostat ou le thermomètre sec en un thermomètre humide tant que la rosée superficielle ne s'est pas évaporée.

Toutes les discussions ci-dessus montrent avec quelles difficultés on mesure une température dans une salle d'une certaine dimension. Suivant la position de l'appareil, suivant le degré d'activité des surfaces d'échange et par conséquent la vitesse des mouvements convectifs, nous trouverons des différences qui atteignent fréquemment et dépassent 2 ou 3°. Or, on a tendance à demander à l'automaticien des réglages très précis à moins de 1° près et même parfois à quelques dixièmes de degré seulement. Il serait donc nécessaire de toujours bien définir avec le client ce qu'il entend par température du local et à quel endroit il placera son appareil de contrôle. Sinon, nous aurons tendance à employer des appareils extrêmement précis qui mesureront une température évidemment exacte au point où ils auront été placés mais qui n'empêcheront pas la température de la salle de varier dans une grande proportion à d'autres points du local.

Dans les locaux industriels et surtout les séchoirs, on peut unifier les températures par un brassage au moyen d'un ventilateur.

THERMOSTAT A CHANGEMENT DE PROGRAMME.

Dans tous les appareils que nous avons étudiés précédemment, le point de fonctionnement du thermostat est constant ou tout au moins, ne peut être modifié que par une manœuvre manuelle.

Lorsqu'on veut au contraire obtenir plusieurs régimes de marche différents suivant les heures de la journée, il faut employer plusieurs thermostats mis en route successivement au moyen d'un contacteur horaire. Nous verrons comment fonctionnent ces appareils et quelles sont leurs caractéristiques de marche.

On peut également demander à l'appareil chronométrique de modifier lui-même le réglage du thermostat en agissant mécaniquement sur l'organe de réglage. Il existe ainsi des thermostats chronométriques donnant un réglage de nuit et un réglage de jour, le changement de régime se faisant aux heures qu'on a choisies sans aucune surveillance de l'appareil.

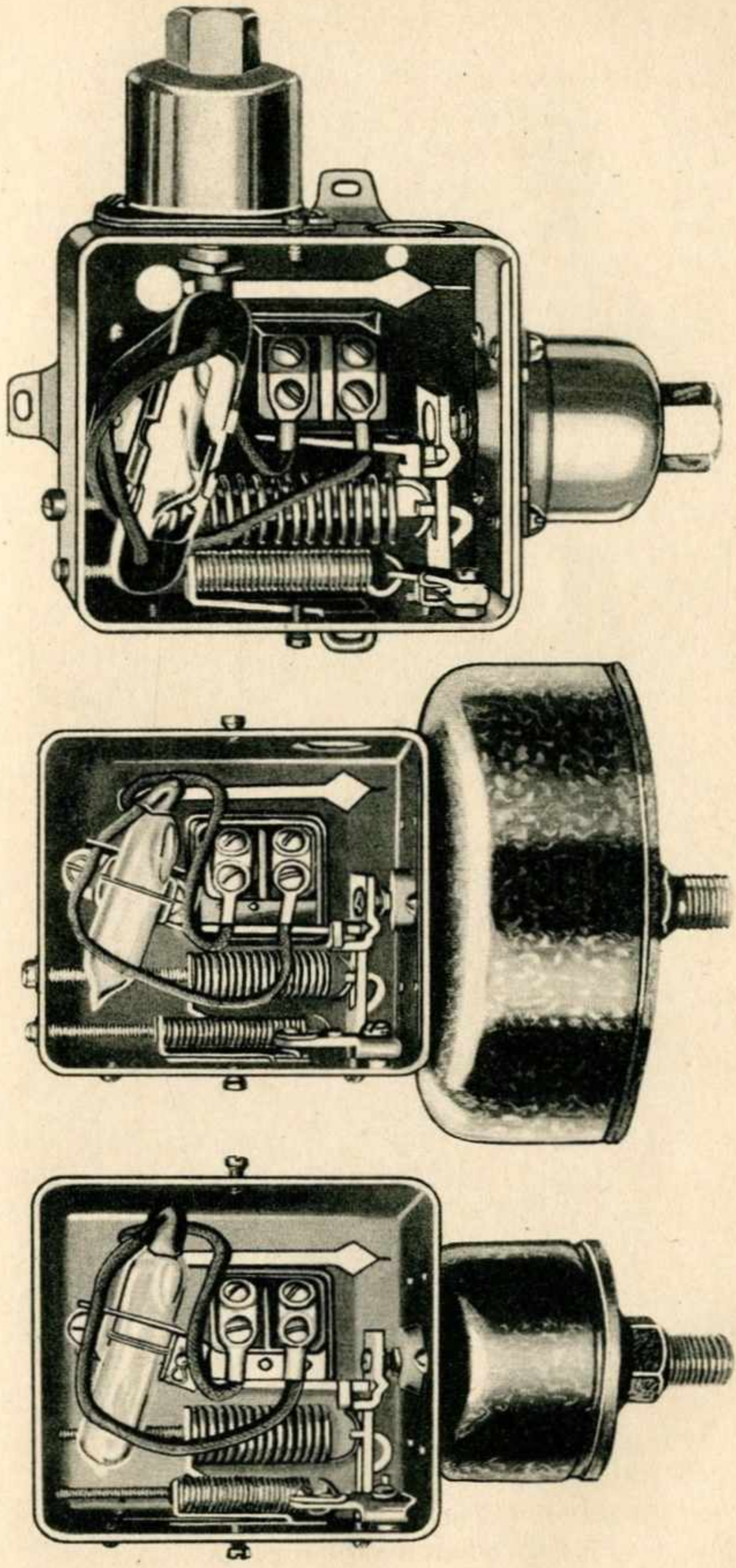


Fig. 36 à 38. — Régulateurs de pression.

De gauche à droite : Régulateur moyenne pression. — Régulateur très basse pression.
Régulateur de sécurité HP pour compresseur frigorifique.



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

On a également constitué des appareils du même genre dans lesquels une came de profil déterminé modifie continuellement le réglage de manière à suivre un programme de température en fonction du temps. Ces appareils sont assez compliqués, généralement coûteux, il ne faut donc les employer que lorsque c'est indispensable.

APPAREILS RÉGULATEURS DE PRESSION

Nous avons fréquemment à détecter des pressions de manière à les limiter ou plus généralement à les modifier. Il s'agit de prendre la pression d'un gaz ou d'un liquide et par conséquent tous les systèmes de manomètres pourront servir à commander un interrupteur électrique ou une fuite de gaz et à constituer ainsi un régulateur de pression ou un « *pressostat* » suivant l'appellation consacrée.

Suivant la valeur de la pression à mesurer nous donnerons la préférence soit à un manomètre à colonne de mercure ou d'eau (basse pression) soit à un soufflet déformable pour les moyennes pressions, soit enfin à la spirale-bourdon pour les hautes pressions (fig. 32 à 34). Pour les basses pressions, on emploie aussi les mouvements d'une cloche équilibrée, genre gazomètre.

Nos mesures ayant lieu généralement entre la pression atmosphérique (ou même de dépression allant jusqu'à un vide d'une cinquantaine de cm. de mercure) et une pression d'une quinzaine de kg. par cm^2 pour les machines à gaz ammoniac, ce sont les manomètres à *membrane déformable* ou à tube plissé qui seront préférés.

Pour que cette membrane soit d'une longue durée, il est nécessaire qu'elle soit constituée en un métal très élastique et on choisit généralement le métal tombac qui est un bronze ternaire Cu-Ni-Zn à haute teneur en cuivre.

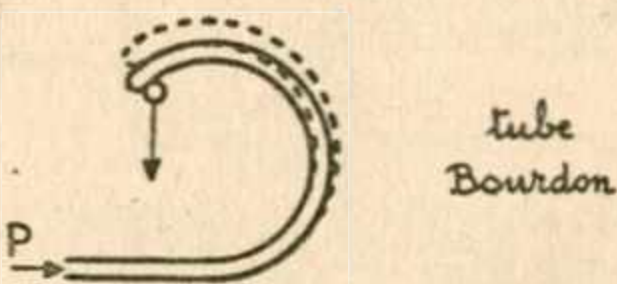
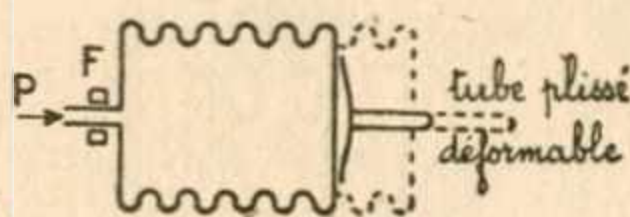
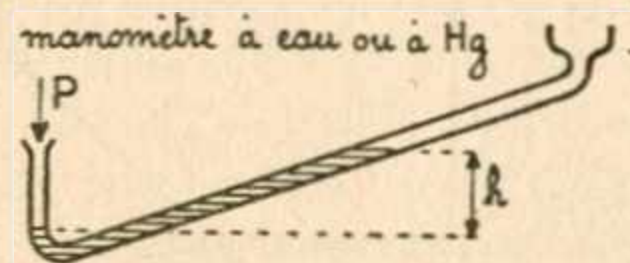


Fig. 32 à 34. — Mesure des pressions.

L'effort antagoniste est constitué d'une part par la pression atmosphérique, d'autre part par un ressort réglable. Nous aurons donc un rajustement à faire suivant l'altitude du lieu et il est à prévoir que nous aurons à réétalonner l'appareil de temps en temps, car les ressorts métalliques sont sujets à des variations dans le temps. De toute manière les indications du pressostat devront être comparées de temps en temps avec celles d'un manomètre étalon.

Généralement, un deuxième ressort attaque le fléau de la balance de pression à un point réglable indépendamment du réglage principal, de telle sorte qu'on puisse faire varier à volonté le différentiel de marche de l'appareil, c'est-à-dire l'écart entre point de coupure et point de réenclenchement. On verra sur la figure ci-dessous l'une des réalisations de ce genre de pressostat (fig. 35).

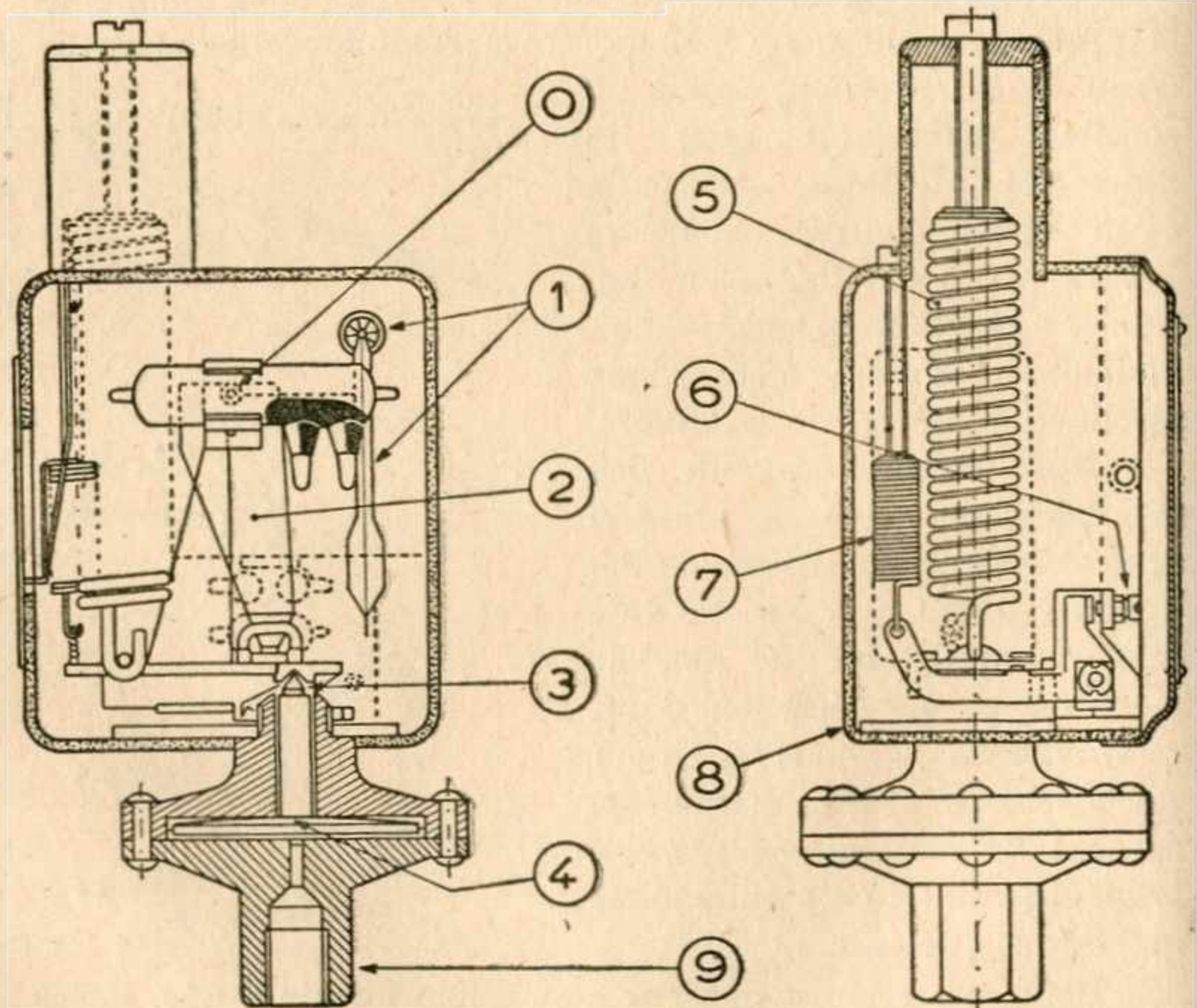


Fig. 35. — Régulateur de pression à membrane plane.

1. Pendule d'aplomb. — 2. Levier d'attaque. — 3. Pointeau du poussoir. — 4. Membrane déformable manométrique. — 5. Ressort de réglage du différentiel. — 8. Boîtier. — 9. Prise de pression.

Tout ce qui s'applique au thermostat s'applique généralement au pressostat, en ce qui concerne les modes d'attaque de l'interrupteur et les différentes manières de réaliser le fonctionnement brusque.

Il y a lieu de tenir compte de la nature du fluide pour choisir la membrane qui convient le mieux à la constitution d'un pressostat car il faut évidemment que cette membrane soit inattaquable au fluide considéré, ce qui oblige souvent à isoler cette membrane du fluide au moyen d'un siphon et de l'interposition d'un matelas d'air ou d'un liquide neutre (huile). Pour le gaz NH_3 , les métaux cuivreux seront exclus. (fig. 36 à 38 en hors texte).

RÉGULATEURS D'HUMIDITÉ

Nous avons fréquemment à mesurer et à régler l'humidité relative de l'air d'un local. Les appareils industriels qui sont à notre disposition sont de deux classes différentes : hygromètres à déformation et psychromètres et encore le choix est-il limité, car le psychromètre, appareil de mesure assez précis, se prête mal à la régulation automatique puisqu'il exige une double lecture (thermomètre sec et thermomètre mouillé) et la connaissance d'un diagramme de correspondance donnant l'humidité relative en fonction des deux indications des thermomètres. Ce diagramme n'étant pas linéaire, le calcul mécanique de l'humidité au moyen d'un psychromètre est une opération difficile et peu utilisée en pratique.

Il nous reste donc à notre disposition les hygromètres à déformation employant des produits hygroscopiques : le bois, le celluloïd et surtout les cheveux. Pour qu'un appareil de ce genre soit exact et donne une puissance suffisante, il est nécessaire d'utiliser une nappe assez importante de cheveux (plusieurs dizaines) agissant sur la balance amplificatrice.

Les régulateurs d'humidité à *nappe de cheveux* sont assez sensibles, leur inertie est faible et les différences de température influent peu sur leur point de fonctionnement. Par contre ils sont peu fidèles car le cheveu se modifie lentement dans le temps et nous serons obligés à des réétalonnages assez rapprochés. Ces réétalonnages se font par comparaison avec les indications d'un psychromètre-fronde. Pour que les indications d'un hygromètre à cheveux soient exactes, il est nécessaire qu'il y ait un certain

mouvement d'air autour de la nappe de cheveux et c'est pourquoi beaucoup d'appareils de mesure sont munis d'un petit ventilateur ; dans les installations frigorifiques et thermiques le mouvement d'air naturel est suffisant la plupart du temps, mais il faut néanmoins prendre des précautions pour ne pas placer le régulateur d'humidité dans une zone morte où le renouvellement d'air ne se fait pas.

Dans les milieux très chargés de poussière et surtout de matières grasses, il est nécessaire de nettoyer de loin en loin les cheveux et pour dissoudre les matières grasses, de les traiter dans un bain d'éther. Un réétalonnage est nécessaire après ces opérations de dégraissage.

Lorsqu'on désire mesurer l'humidité dans une atmosphère très chaude ou très froide, il faut que l'appareil comprenne une compensation de la température, l'humidostat normal n'étant utilisable qu'entre -5 et $+40^{\circ}$.

En résumé, le régulateur d'humidité à nappe de cheveux est un instrument robuste et simple donnant satisfaction à condition de le réétalonner et de le nettoyer de loin en loin. On peut obtenir des réglages exacts à 2 % près d'humidité relative environ dans la zone d'utilisation pratique, c'est-à-dire entre 20 et 95 % d'humidité relative (aux environs de l'humidité de 100 % les variations de longueur des cheveux sont extrêmement faibles et l'appareil est peu sensible). (fig. 39 en hors texte.)

Ce régulateur d'humidité fonctionne convenablement jusqu'aux environs de 0° et même un peu au-dessous. mais ces indications sont faussées lorsqu'il y a danger de congélation de la couche d'humidité qui peut se déposer sur les cheveux en atmosphère très froide, d'ailleurs la mesure de l'humidité dans les salles de congélation est un problème très difficile et qui n'est pas encore entièrement résolu tout au moins par des appareils industriels courants.

Les humidostats utilisant comme organe sensible une lamelle de bois généralement percée de quelques trous, augmentant la surface de contact avec l'air, sont de réaction beaucoup moins rapide que les cheveux et leur allongement sous l'influence de l'humidité est également très faible. On s'en sert cependant pour commander les régulations pneumatiques, tenant compte de ce fait que les appareils à fuite d'air sont sensibles à des mouvements inférieurs au $1/10^e$ de mm. et que moyennant

une seule amplification de 1 à 10 on peut arriver à déceler des allongements ne dépassant pas $1/100^e$ de mm.

On a aussi essayé de se servir de la variation de conductibilité électrique surtout pour mesurer l'humidité des produits eux-mêmes, mais cette méthode est encore peu employée en Europe.

RÉGLAGE DE LA VITESSE DES FLUIDES

Nous avons fréquemment à mesurer la vitesse de l'air dans une gaine ou même dans une chambre. Cette mesure peut se faire avec un *moulinet* dont on mesure le nombre de révolutions. Cette mesure continue se fait en actionnant au moyen du moulinet une petite magnéto ; on mesure alors, soit le voltage du courant produit, soit sa fréquence. On peut également se servir du *tube de Pitot* placé de part et d'autre d'un diaphragme calibré. La mesure revient alors à celle d'une différence de pression entre les deux ajutages du tube. Comme il s'agit de très faibles différences de pression, on se sert d'un manomètre à eau généralement à tube incliné.

Dans les liquides les deux méthodes précédentes seraient également utilisables, mais on donne le plus souvent la préférence à la seconde.

RÉGLAGE DES DÉBITS DES FLUIDES.

La mesure des débits se réduit à une mesure de vitesse des fluides quand on connaît exactement la section de la gaine ou du tube véhiculant le fluide ainsi que le coefficient de contraction donnant la section nette de ce conduit. On utilise généralement la méthode du tube de Pitot avec interposition entre les deux ajutages, d'un diaphragme calibré dont on connaît très exactement la résistance et la perte de charge correspondante.

RÉGLAGE DES QUANTITÉS DE CHALEUR.

Les quantités de chaleur qui sont transportées par les fluides sont égales au produit de la quantité de chaleur transportée par unité de volume ou de poids du fluide multipliée par le débit de ce fluide. Nous aurons donc à mesurer séparément le débit et la différence des températures entre l'entrée et la



sortie dans l'appareil en supposant connue la capacité calorifique de l'unité de poids ou de volume du fluide. Nous aurons ensuite à intégrer le produit $\int Q dt$ et nous devons donc avoir affaire à un compteur intégrateur. Il a été fait de semblables compteurs basés sur le même principe que les compteurs électriques, le rotor du moteur tournant proportionnellement au débit du fluide tandis que l'inducteur recevait une f.é.m., proportionnelle à la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide. En remarquant qu'un couple thermo-électrique dont les deux soudures sont soumises aux températures d'entrée et de sortie donne une d.d.p. proportionnelle à l'écart de température entre les deux soudures, on conçoit qu'il soit relativement facile de construire un pareil compteur de calories.

On a également cherché à utiliser les lois de l'évaporation des liquides en fonction de la température, mais jusqu'à présent, ce système n'a pas conduit à l'élaboration d'un compteur industriel précis.

ANALYSEURS DE GAZ

Pour le conditionnement chimique des salles de conservation, nous aurons besoin de posséder des analyseurs de gaz de manière à régler l'émission et le mélange dans l'atmosphère gazeuse.

Les analyseurs du genre de celui d'Orsat peuvent être modifiés pour devenir des analyseurs continus en transformant les hauteurs de liquides dans les éprouvettes en pression mesurable par un manomètre à eau, une fuite continue et tarée évacuant progressivement les gaz après analyse, ces gaz étant renouvelés continuellement au travers du réactif.

Certains analyseurs sont basés sur la conductibilité électrique des gaz et donnent satisfaction si les gaz contenus sont connus. On sait en effet que la conductibilité électrique varie beaucoup suivant la nature des gaz et on peut mesurer séparément la teneur des gaz en CO_2 ou en H_2 , si l'atmosphère contient ces gaz.

APPAREILS CHRONOMÉTRIQUES

Dans presque tous nos appareillages automatiques nous serons obligés de prévoir un programme d'opérations variable

suivant les heures de la journée et souvent suivant les jours de la semaine. C'est dire que nous aurons à faire intervenir des appareils chronométriques établissant ou coupant le circuit à des heures déterminées ou encore modifiant les constantes électriques de ce circuit sans les couper.

Les appareils chronométriques conduisant des interrupteurs ou des rhéostats peuvent être basés sur les principes suivants :

a) APPAREILS A ÉCHAPPEMENT MÉCANIQUE.

C'est le principe le plus courant de la chronométrie usuelle : l'effort moteur d'un ressort ou d'un poids est libéré d'une manière synchrone par un échappement, généralement à ancre, dont le propre mouvement est entretenu à chaque oscillation.

L'organe régulateur peut être : soit un balancier ordinaire, soit un balancier circulaire d'inertie. Dans le premier cas l'effort antagoniste est la pesanteur, dans le 2^e cas, le ressort de rappel dit spiral. On connaît les divers phénomènes perturbateurs qui peuvent agir sur ces mouvements : variations de l'accélération de la pesanteur (action de l'altitude), variations de longueur du balancier (notamment sous l'influence des différences de température : balanciers en invar et compensateurs), pour le spiral : influence des différences de températures et action des efforts magnétiques pouvant aimanter le spiral. Enfin, pour tous les appareils, modification dans le temps des lubrifiants qui ont tendance à se gommer, et nécessité de nettoyage périodique du mouvement.

Dans nos appareils industriels c'est presque toujours aux pendules circulaires d'inertie que nous aurons affaire, ce qui évite le calage minutieux du pendule.

Ces appareils donneront un certain nombre de coupures et de réenclenchements par vingt-quatre heures au moyen de cames ou d'ergots placés sur la périphérie d'un disque faisant un tour en vingt-quatre heures.

Il faut toujours faire préciser au constructeur le nombre d'enclenchements et de réenclenchements que ce système permet d'obtenir en vingt-quatre heures et la durée minimum d'une période de fermeture et d'une période d'ouverture de l'interrupteur.



quence parfaitement connue. Ce système a permis la construction d'horloges électriques possédant simplement un moteur synchrone et un train démultiplicateur sans aucun organe d'échappement. Le moteur synchrone est constitué par un inducteur à six ou huit pôles, le rotor comprenant une couronne ou un disque denté en fer doux dont les dents successives sont aimantées alternativement nord et sud. Dans certains appareils il faut lancer le moteur à la main pour « l'accrocher » au champ tournant, dans d'autres appareils le démarrage est automatique, le disque étant entraîné au début comme un moteur asynchrone, puis l'accrochage se produisant lorsque la vitesse de synchronisme est presque atteinte.

Ces appareils chronométriques à mouvement synchrone prenaient un très grand développement avant la guerre et auront certainement des applications nombreuses lorsque les secteurs électriques auront repris leur exploitation normale. Nous donnerons la préférence aux appareils à démarrage automatique de manière à ce qu'une panne de réseau n'oblige pas à une intervention manuelle de remise en route. Dans ce cas l'horloge retarde simplement du temps d'arrêt du secteur. Cet inconvénient est tout à fait négligeable sur les réseaux bien tenus, les arrêts de secteur étant excessivement rares et de durée très limitée. Sur le réseau de Paris, nous avons eu un grand nombre d'horloges de ce genre, lesquelles, pendant les années 1935 à 1938 n'ont donné lieu qu'à deux ou trois remises à l'heure de quelques minutes seulement. Certains appareils ont été munis d'un mouvement auxiliaire à échappement mécanique et remontage électrique qui se substituent automatiquement au mouvement synchrone lors des pannes de secteur. C'est là une complication coûteuse, généralement inutile.

CHAPITRE III

APPAREILS DE RÉGULATION SPÉCIFIQUEMENT FRIGORIFIQUES

Tous les appareils que nous avons étudiés jusqu'à présent peuvent être utilisés en régulation automatique pour toutes les industries thermiques et ceux que nous utilisons dans l'industrie frigorifique ne diffèrent de ceux qui sont utilisés en chauffage par exemple, par que les échelles de fonctionnement. Par contre, nous allons étudier quelques appareils qui sont spécifiquement frigorifiques.

APPAREILS DESTINÉS AU RÉGLAGE DU REMPLISSAGE D'UN ÉVAPORATEUR

Dans beaucoup d'installations, on donne la préférence à des évaporateurs constamment pleins de liquide frigorigène, de manière à ce que l'efficacité soit augmentée, puisque les échanges thermiques sont beaucoup plus actifs entre liquide et paroi métallique qu'entre un gaz, même humide, et la même paroi métallique. Cette condition est d'autant plus impérieuse lorsqu'il s'agit de petits appareils frigorifiques domestiques comme les armoires ménagères dans lesquelles l'encombrement doit être réduit le plus possible pour laisser une capacité aussi grande que possible utilisable pour les aliments. Notre système comprendra donc un évaporateur de petites dimensions constitué généralement par un tube enroulé, le centre de l'enroulement étant réservé à quelques tiroirs à glace. Ces tubes doivent être

aussi pleins que possible de liquide frigorigène et cependant il faut que le liquide ne puisse pas quitter l'évaporateur sans avoir produit l'effet frigorifique que l'on recherche par son évaporation. Il faut donc régler la hauteur du liquide dans l'évaporateur et maintenir cette hauteur nettement au-dessous de la tubulure d'évacuation allant au compresseur. On comprend le danger qu'il pourrait y avoir à laisser entraîner des quantités appréciables de liquides non évaporés qui se trouveraient aspirés par le compresseur et risqueraient de donner un « coup de liquide » en s'amassant entre le piston et le fond du cylindre au moment de la compression.

Pour réaliser ce programme, on utilise généralement un flotteur placé à la hauteur que l'on désire et disposé soit à l'intérieur de l'évaporateur lui-même, soit à l'extérieur dans une capacité en relation directe avec le liquide et avec le gaz. (fig. 40.)

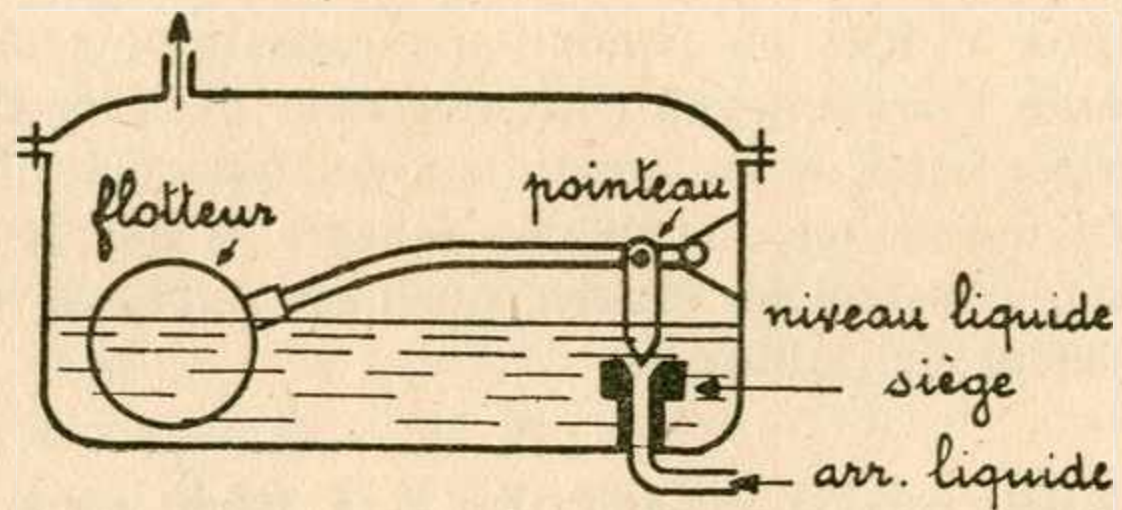


Fig. 40. — Robinet à flotteur HP ou BP.

Ce flotteur actionne mécaniquement, au moyen de leviers, l'ouverture ou la fermeture d'un pointeau en acier inoxydable qui laisse entrer le liquide lorsque le niveau baisse et qui obstrue au contraire son arrivée lorsque le niveau est atteint. Comme l'évaporation commence à se produire au passage du liquide sous le pointeau, ce point est à une température généralement très basse et il faut prendre des précautions pour qu'il ne s'y produise pas un bouchon de glace pouvant provenir de traces d'humidité contenues dans le fluide frigorigène. Il faut également prendre des précautions pour que le pointeau ne puisse s'obstruer ou se coller sur son siège par suite d'entraînement de matières étrangères provenant des tuyauteries ou du lubrifiant. Ces précautions sont : le filtrage très fin du liquide et la déshydratation aussi poussée que possible du fluide, c'est pour-



quoi nous verrons toujours, très près du pointeau d'admission, un bon filtre à soie de verre ou à coton et un déshydrateur constitué par un cylindre en métal contenant une charge d'un produit hygroscopique qui peut être soit le chlorure de calcium soit des produits fixant l'eau par adsorption tel que le silica-gel, l'alumine activée, la mousse de Zn ou le charbon actif. Le premier de ces produits a l'inconvénient de se déliter et d'être entraîné au bout d'un certain temps par le fluide, tandis que les autres ne se modifiant pas, présentent à un degré beaucoup moindre l'inconvénient ci-dessus. Cependant il est prudent de placer un bon filtre après le déshydrateur de manière à arrêter les parcelles des produits qui pourraient s'en échapper. Une bonne précaution est également de ne laisser le déshydrateur en place que pendant quelques jours de marche de l'appareil, sa présence n'étant plus nécessaire ensuite puisque toute l'eau contenue a été fixée sur le produit. On devrait donc donner des instructions aux monteurs pour que le déshydrateur soit démonté après quelque temps de marche. Il n'y a ensuite aucune raison pour que de l'humidité soit de nouveau absorbée par le système sauf les cas très rares où la pression d'évaporation est inférieure à la pression atmosphérique et où l'on pourrait craindre, par conséquent, des entrées d'air humide. Ce cas ne peut guère se présenter qu'avec l'anhydride sulfureux dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique n'est que de -10° (pour le chlorure de méthyle, cette température est voisine de -23°). Ce n'est qu'au-dessous de cette température qu'il y aurait une crainte de rentrée d'air.

Le flotteur à robinet pointeau a généralement la forme représentée à la figure 40 et si le pointeau et son siège sont en bon métal non oxydable, bien choisi pour que le fonctionnement produise un léger matage du siège à chaque fonctionnement, on obtient assez facilement une marche parfaite et prolongée à condition que les conditions de propreté ci-dessus soient toujours remplies.

On a aussi cherché à augmenter l'effort sur le siège de la soupape en employant une énergie étrangère, dans ce cas le flotteur commande un interrupteur à mercure qui agit électriquement sur une vanne électromagnétique dont la puissance peut être aussi grande qu'on le désire. On élimine ainsi les risques de coincement de la soupape et même, dans bien des cas, le collage du pointeau sur son siège car l'effort électro-



magnétique est suffisamment grand pour s'opposer efficacement à tout collage.

Le système décrit ci-dessus comprenant un flotteur sur l'évaporateur fonctionnant noyé « flooded system » est connu sous le nom de réglage sur la basse pression.

On peut également utiliser un flotteur sur la partie haute pression du système en réglant le niveau du liquide dans le receiver, de cette manière il ne passe à l'évaporateur que la quantité de liquide nécessaire, mais alors l'évaporateur n'est plus noyé complètement et il faut éviter l'arrivée brutale d'un jet de liquide dans l'évaporateur en créant une résistance spéciale à l'entrée de l'évaporateur afin de s'opposer dans une certaine mesure à l'afflux brutal qui pourrait se produire. Ce système de réglage sur la haute pression a été assez utilisé dans les meubles réfrigérateurs, il faut reconnaître cependant qu'il est plus délicat à régler que le système à basse pression.

RÉGLAGE DE LA DÉTENTE

Avec les systèmes précédents, nous avons réglé la quantité de liquide introduit à l'évaporateur en nous basant sur la hauteur de ce liquide en un certain point du cycle. Un autre système peut être utilisé, qui est basé sur des différences de température ou de pression.

VANNE PRESSOSTATIQUE, dite « automatique » (fig. 41)

Si nous interposons sur la tuyauterie une soupape commandée par un organe manométrique, nous pourrions régler l'arrivée du liquide de telle manière que la pression à l'évaporateur soit constante. Ce dispositif est réalisé par la vanne

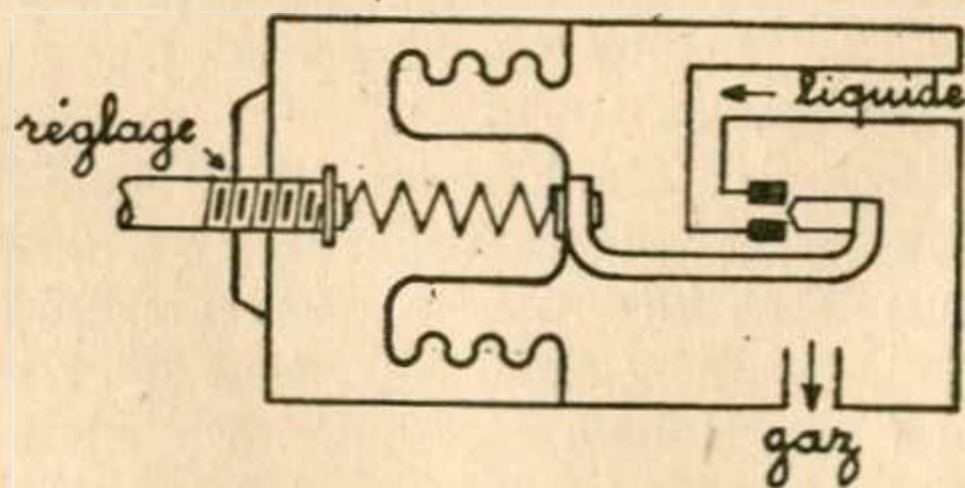


Fig. 41. — Détendeur automatique ou pressostatique.

pressostatique représentée par la figure 41. Elle est constituée par une capacité déformable formée par un tube plissé, élastique, qui laisse ouvrir le pointeau lorsque la pression dans l'évaporateur croît et qui le ferme pour une pression d'évaporation déterminée. Ce système permet de régler à une valeur constante la pression, c'est-à-dire la température d'évaporation. Nous utiliserons fréquemment cette vanne lorsque nous aurons plusieurs évaporateurs en parallèle devant fonctionner à des températures différentes. Nous pourrions en effet régler le groupe compresseur pour la température de l'évaporateur le plus froid et nous empêcherons

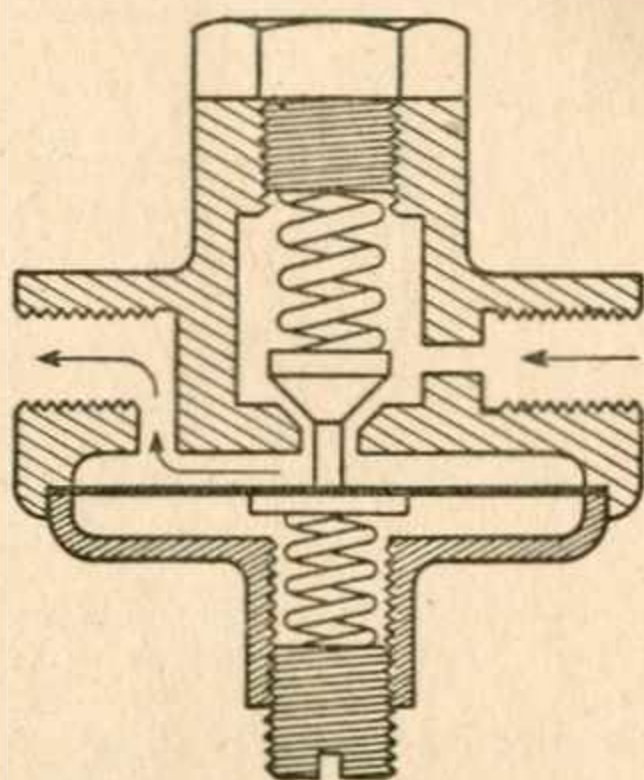


Fig. 42. — Détendeur automatique à diaphragme.

l'évaporation à trop basse température dans les autres évaporateurs au moyen d'une vanne pressostatique convenablement réglée.

On utilise aussi fréquemment la vanne pressostatique comme organe de détente dans les armoires frigorifiques fonctionnant en évaporation sèche.

Dans certaines fabrications, le tube plissé est remplacé par une membrane plane. (fig. 42)

VANNE DE RÉGLAGE DE SURCHAUFFE (fig. 43).

Une modification simple à la vanne pressostatique nous permet de maintenir constante la surchauffe à l'évaporateur c'est-à-dire l'écart de température du gaz à la sortie de l'évaporateur par rapport à la température d'évaporation. Si nous nous fixons cet écart (généralement aux environs de 5°) nous sommes assurés que le liquide est vaporisé dans une fraction de cet appareil avant de le quitter. Par conséquent, nous serons assurés qu'il n'y a plus de liquide à l'aspiration et que le froid a été assez bien utilisé par l'évaporateur.

Pour réaliser ce programme on utilise une vanne très analogue à la vanne pressostatique déjà décrite, mais dans laquelle la vis de réglage de la pression est commandée automatiquement par la pression provenant d'un organe thermostatique qui est généralement un bulbe contenant un fluide

liquéfié. Si ce fluide est le même que celui qui sert à réfrigérer tout le système (si, par exemple, le bulbe est chargé avec du

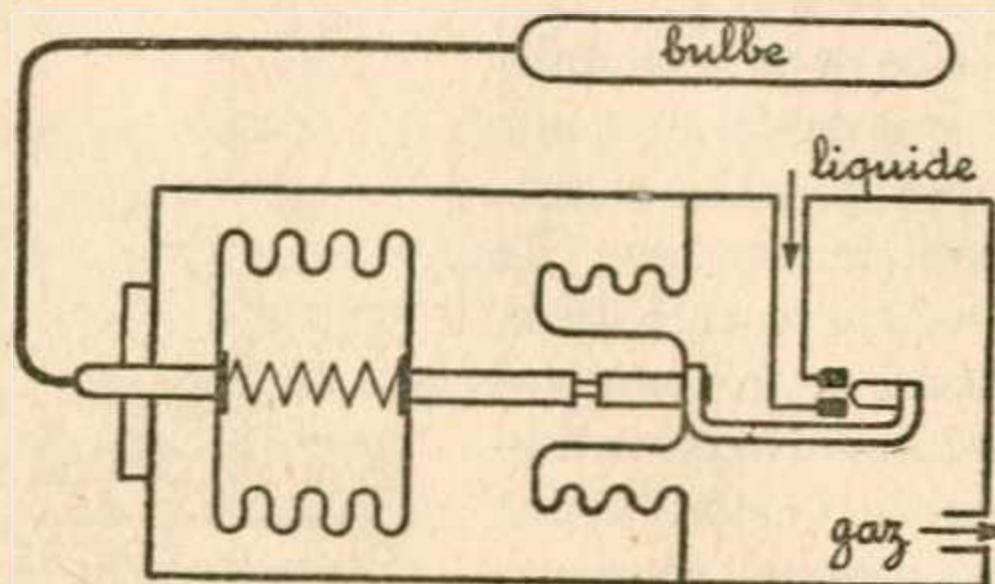


Fig. 43. — Détendeur thermostatique ou à surchauffe constante.

chlorure de méthyle dans une installation frigorifique à chlorure de méthyle) la pression d'évaporation sera réglée de telle manière que la température des gaz à la sortie ne présente que quelques degrés d'écart avec la température d'ébullition du liquide. Cette vanne à surchauffe constante qui est appelée improprement vanne thermostatique ne règle pas du tout la température de l'évaporation mais bien la surchauffe dans l'évaporateur. Cet appareil est très utilisé dans les appareils frigorifiques de petite ou de moyenne puissance pour régler l'admission de liquide dans l'évaporateur. Les figures 44 et 45 montrent deux exemples de réalisation.

Les défauts de fonctionnement de cette vanne sont les mêmes que ceux dont nous avons parlé pour les flotteurs ; il faut donc prendre toutes les précautions pour éviter le bouchon de glace ou le collage du pointeau sur son siège par les moyens que nous avons déjà indiqués. Il y a lieu aussi de s'opposer au givrage extérieur du soufflet déformable car la couche de glace pourrait gêner le fonctionnement de l'appareil. Pour l'éviter il faut, d'abord, que le corps de détendeur soit placé à un endroit dont la température n'est pas trop basse et, d'autre part, protéger les soufflets déformables par une enveloppe aussi étanche que possible à l'air humide.

Pour que le détendeur à surchauffe constante donne les résultats qu'on en attend, il est nécessaire que le bulbe thermostatique soit placé à la sortie de l'évaporateur et que le contact thermique soit bien établi entre le tube d'aspiration et le bulbe thermométrique. Il faut aussi que ce bulbe soit bien



à la température minimum de tout le système et, qu'en particulier, le corps de ce détendeur soit toujours à une tempé-

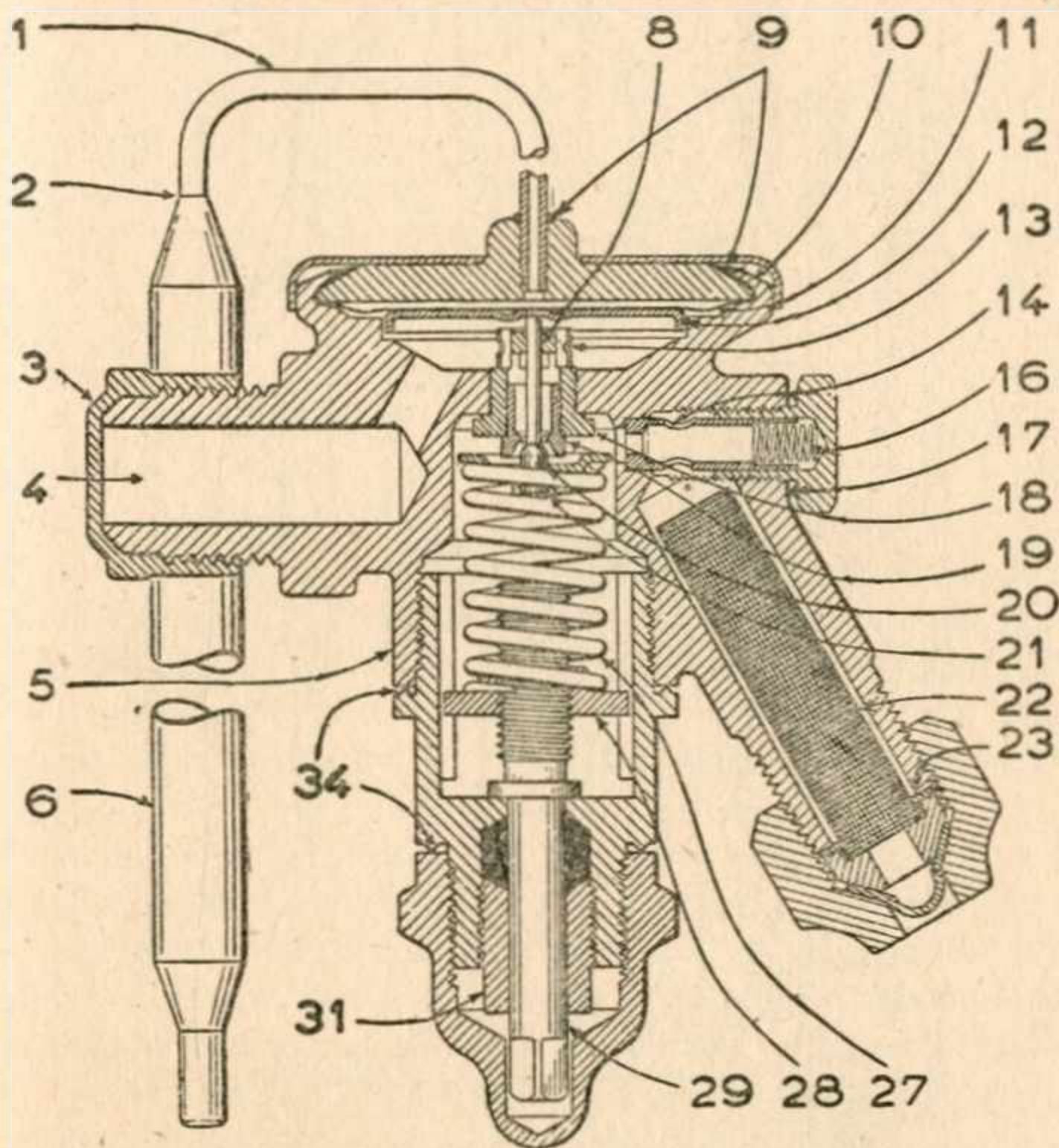


Fig. 44. — Détendeur thermostatique à membrane plane (à surchauffe constante)

Légende : 1. Tube capillaire (longueur standard : 1 m. 52). — 2. Bulbe et tube en une seule pièce. — 3. Capuchon de fermeture. — 4. Sortie. — 5. Corps en bronze forgé. — 6. Bulbe thermométrique (diam. : 9,5, long. tot. 103). 8. — Poussoir. — 9. Soudure. — 10. Joint repoussé. — 11. Membrane. — 12. Plateau de poussée. — 13. Tube d'équilibre de pression. — 14. Orifice interchangeable. — 16. Ressort en inoxydable. — 17. Joint à couteau. — 18. Support de siège. — 19. Siège. — 20. Bille de soupapes. — 21. Guide de bille. — 22. Filtre. — 23. Joint de filtre. — 27. Ressort en inox. — 28. Ecrou de réglage non rotatif. — 29. Tige filetée de réglage de la surchauffe. — 31. Presse étoupe. — 34. Joint à couteau.

rature nettement supérieure au bulbe. On verra sur la figure 47 la bonne position d'un détendeur à surchauffe constante.

Dans l'exemple choisi qui est celui du bac de refroidissement d'eau, on voit que si le bulbe a été placé au-dessus du

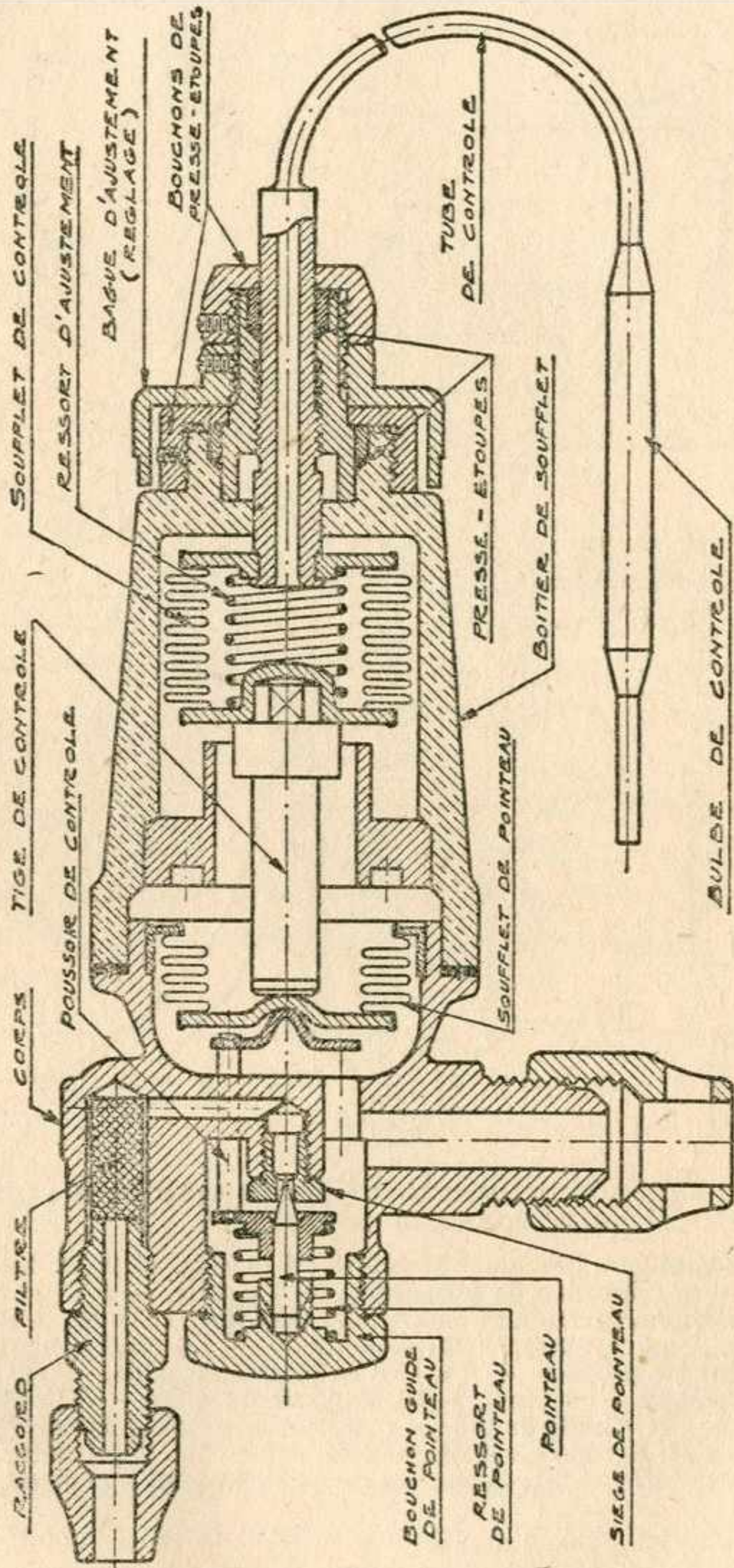


Fig. 45. — Détendeur thermostatique à soufflet.

niveau de l'eau il se refroidit pendant les périodes d'arrêt du compresseur commandant l'ouverture de la vanne. Le serpentin de l'évaporateur s'emplit donc de liquide et, à la remise en marche du compresseur, nous aurons un givrage intense et peut-être un « coup de liquide ».

Quand on veut refroidir de l'eau très près du point de congélation (entre 0 et $+4^{\circ}$), il faut se rappeler que le maximum de densité de l'eau étant vers $+4^{\circ}$, il est nécessaire que le serpentin d'évaporation soit placé au fond de la cuve à eau.

Dans certains cas, l'évaporateur peut présenter une grande résistance au passage du médium frigorigé, la pression au point où le bulbe est placé est alors beaucoup plus basse qu'à la sortie de la vanne (par suite de la perte de charge), le liquide qui se trouve aux environs du bulbe s'évapore donc à une température très basse, ce qui a pour effet de fermer la vanne automatique de surchauffe alors qu'il faudrait qu'elle s'ouvre puisque les besoins de froid augmentent. Pour éviter ce phénomène, on a imaginé des vannes spéciales dans lesquelles il existe un tube d'équilibre de pression aux environs du point de prise de température, on règle bien ainsi la surchauffe réelle à ce point.

Enfin, le bulbe de certaines vannes américaines est chargé avec du gaz seulement (et non avec un liquide surmonté de son gaz). Le gaz choisi se liquéfie seulement à la température où l'on travaille, au-dessus la tension est suffisante pour fermer hermétiquement la soupape. On évite ainsi de noyer l'évaporateur pendant les arrêts. La figure 46 donne les diagrammes de fonctionnement des vannes à liquide et à gaz.

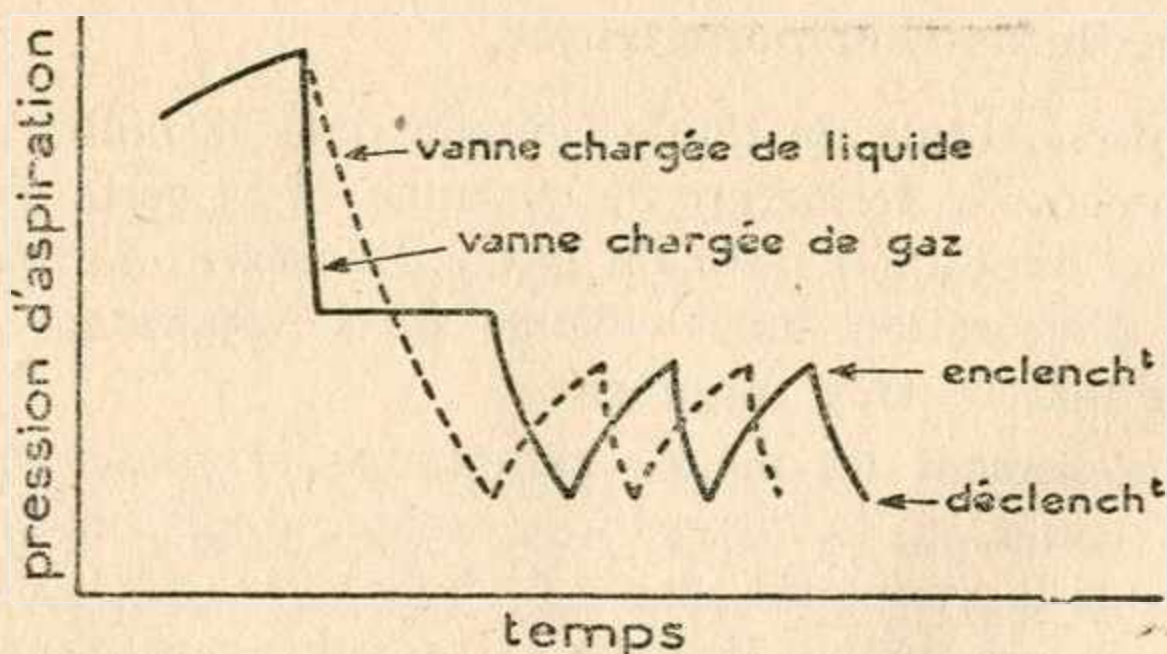


Fig. 46. — Diagramme de fonctionnement des vannes de surchauffe



Les vannes à surchauffe constante donnent souvent lieu à des plaintes que nous allons étudier.

Vanne gelée.

La moindre trace d'humidité dans le fréon ou le chlorure de méthyle suffit pour coller la vanne en position de fermeture ou parfois, en position d'ouverture. Dans le 1^{er} cas, l'évaporateur se vide, dans le 2^e cas, il se noie.

La présence d'un déshumidificateur ne suffit pas à affirmer que le système est déshydraté. D'ailleurs, si l'humidité s'est congelée dans l'évaporateur, elle peut rester là sans que le déshumidificateur joue. C'est pourquoi on voit parfois une installation marcher convenablement pendant un an sans trouble et se boucher brusquement par congélation. C'est l'humidité qui est passée de l'évaporateur dans le système.

Si le compresseur, après une longue période d'arrêt, se règle normalement pendant quelques minutes, puis se congèle brusquement, c'est qu'on a bien affaire à un bouchon de glace.

En frappant doucement sur le corps de la vanne d'expansion, on arrive souvent à remettre en marche normalement pour quelques instants.

Sinon, il faut sécher à fond le système, changer l'huile, mettre un déshydrateur assez gros avec un produit bien frais (alumine activée de préférence) et ajouter au médium frigorigène une dose d'un produit fixant l'eau ou l'empêchant de se congeler (méthanol : non utilisable avec SO₂) ou plutôt « Thawzone ».

Perte de fluide thermométrique.

La perte totale du fluide contenu dans le bulbe thermométrique cause la fermeture de la vanne. Si la perte n'est que partielle et tant qu'il reste du gaz, on observe une baisse de pression d'aspiration, une vidange de l'évaporateur et des cycles de marche trop rapprochés.

Naturellement les mêmes symptômes se présentent si la vanne est gelée, si les filtres ou le déshydrateur sont bouchés, ou encore si la vanne est placée de telle sorte que le corps est plus froid que le bulbe. Il faut s'en assurer avant d'incriminer la vanne elle-même.

Vanne mal placée.

Si le corps de la vanne peut devenir plus froid que l'élément, la vanne se ferme et bloque le système. Se souvenir que la vanne ne doit pas être fixée sur la partie active de l'évaporateur, ni sur le bac à saumure ; de même pour le tube capillaire. Il est facile de déceler ce trouble en chauffant le corps et le tube capillaire avec la main : le trouble disparaît pour un temps.

Vanne mal réglée.

Le réglage de la vanne a pour effet, soit de vider, soit de remplir davantage l'évaporateur. Dans les vannes bien faites, le dérèglement spontané est fort rare et improbable, sauf vidange du bulbe. Donc, si une installation, qui a bien marché un certain temps, se dérègle, il est fort probable que la vanne de détente n'est pas en cause. Il faut rechercher ailleurs.

Bulbe mal placé. (fig. 47)

La capsule thermostatique doit être fixée immédiatement à la sortie de l'évaporateur et ne doit pas être affectée par la température de la chambre. S'il y a plusieurs tubes évaporateurs en parallèle, mettre la capsule à un endroit où la tempé-

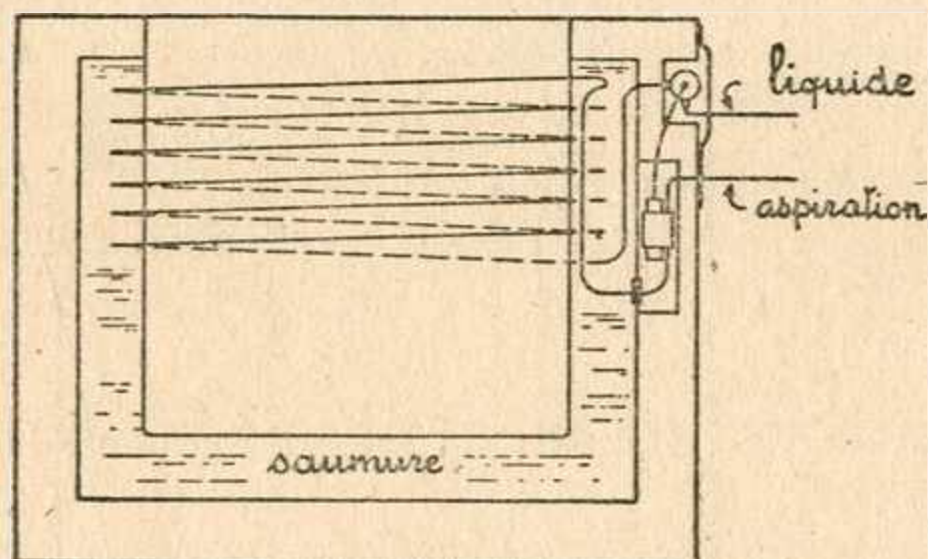


Fig. 47. — Installation d'un détendeur à surchauffe constante sur un bac à eau.

rature est la moyenne des différents tubes. Protéger le bulbe contre les courants d'air chauds au moyen de caoutchouc mousse. Souvent, les troubles de cette nature apparaissent à un changement de saison, ce qui peut faire croire faussement, à une avarie brusque de la vanne.

Fuite à la vanne.

Si toutes les causes de mauvais fonctionnement ci-dessus ont été éliminées méthodiquement, et alors seulement, on peut penser à une vanne non étanche. Dans ce cas, il faut l'essayer de la manière suivante.

Essai de la vanne automatique de surchauffe.

Il suffit d'avoir à sa disposition, soit de l'air comprimé à 5 ou 7 kg., soit une bouteille de chlorure de méthyle ou de fréon (peu importe que ce soit le même fluide que dans l'installation ou non). Un manomètre de haute pression et de basse pression, et un peu de glace dans une bouteille thermos.

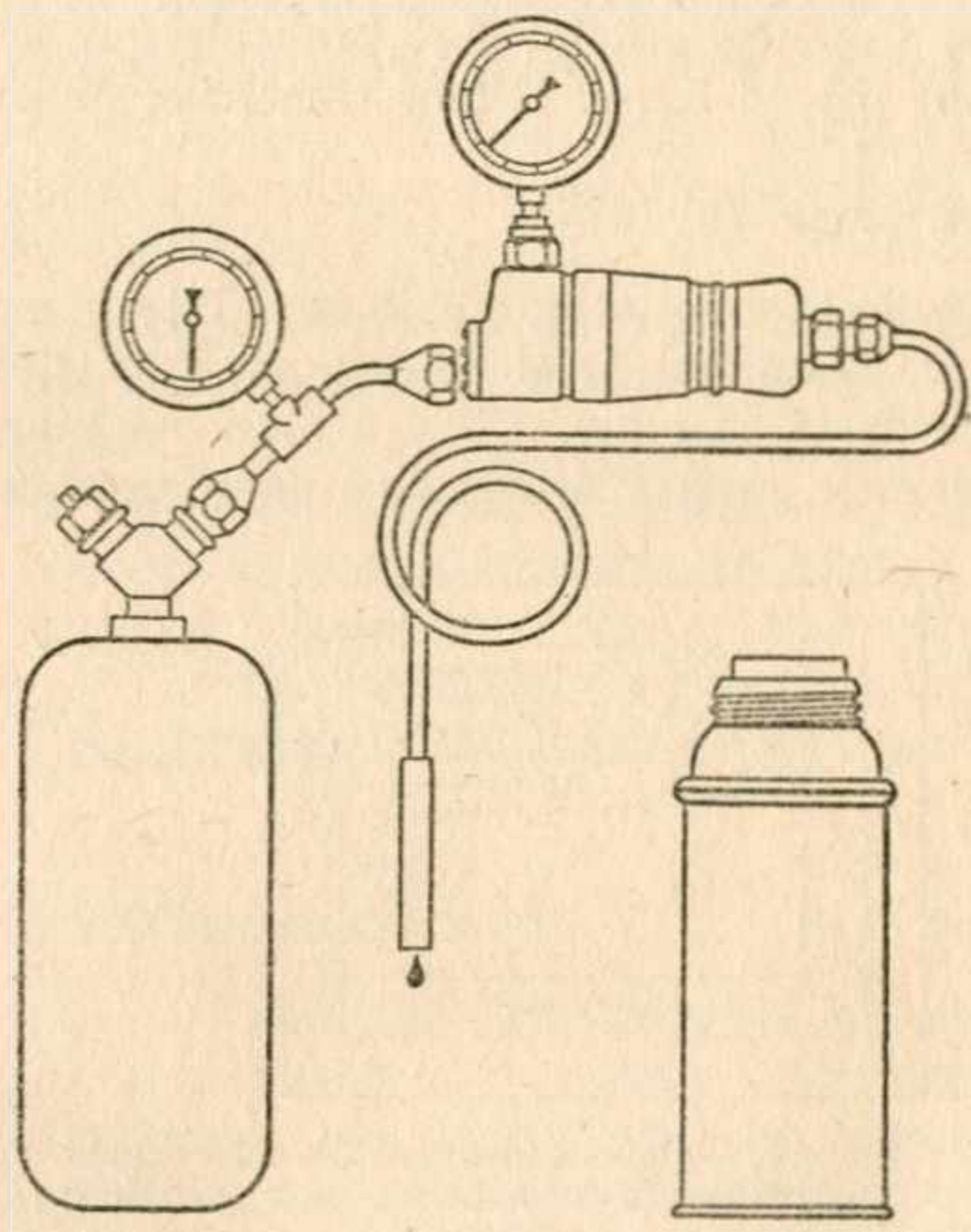


Fig. 48. — Essai d'un détendeur.

On fait le montage de la figure 48, le manomètre de basse pression étant simplement vissé sans serrer, en laissant une légère fuite. On plonge le bulbe dans l'eau glacée de la bouteille thermos, et on ouvre la bouteille de manière à avoir une pression

de 5 kg. au manomètre d'entrée. Rappelons qu'à 0° (glace fondante) au bulbe et en admettant, comme d'usage, une surchauffe de 5°C il faut obtenir à la sortie la pression d'évaporation correspondant à - 5°, soit :

1 kg. 550 pour le fréon,
1 kg. 050 pour le CH₃ Cl,
0 kg. 210 pour le SO₂.

S'assurer qu'il y a bien réellement une fuite au manomètre de sortie et régler la vanne pour obtenir la pression voulue ci-dessus. Frapper légèrement le corps de la vanne, les écarts de pression ne doivent pas dépasser 50 à 100 grammes.

Ensuite, serrer le manomètre de sortie pour arrêter la fuite et voir si la pression monte. Si la vanne est bonne, la pression ne doit monter que de 100 à 200 grammes puis s'arrêter ou monter très lentement. Si les pressions aval et amont s'équilibrent, c'est que la vanne fuit.

Ensuite, sortir le bulbe de la glace et l'échauffer rapidement, après avoir créé à nouveau la fuite de l'aval. La pression aval doit monter rapidement ce qui prouve que l'élément thermostatique est intact. Sinon, il faut changer l'élément.

Dans le cas où les pressions aval et amont s'équilibrent, on peut rechercher s'il y a une fuite au soufflet thermostatique au moyen d'une lampe détectrice (Halide) (1).

Pendant ces essais il faut s'assurer que la bouteille thermostatique contient assez de glace pour qu'on ait réellement 0 degré. Il faut aussi que la température environnant la bouteille de fréon ou de chlorure soit assez élevée pour que ce fluide soit à une pression supérieure à 5 kg.

VANNE D'ASPIRATION A DEUX TEMPÉRATURES.

Quand nous avons à régler une installation comprenant un seul compresseur mais plusieurs évaporateurs à températures différentes, nous devons, comme il est dit plus haut, régler séparément les évaporateurs afin que le groupe continue à aspirer dans l'évaporateur le plus froid, tandis que les autres évapo-

(1) La lampe d'Halide est une lampe à alcool dont la flamme lèche une lame de cuivre. Dans les produits chlorés ou fluorés, on forme des halogénures de cuivre (chlorures ou fluorures) qui colorent la flamme en vert. Cette réaction est très sensible et on peut déceler la présence de fréon ou de chlorure (de méthyle ou d'éthyle) dans de l'air ne contenant que 1/1000 du produit.

rateurs sont isolés du système aussitôt que leur propre température est suffisamment basse. Pour obtenir cet isolement automatique nous pourrions employer plusieurs systèmes que nous examinerons plus loin, mais dans certains de ces systèmes devront intervenir, soit des vannes pressostatiques se fermant lorsque la pression d'évaporation est suffisamment basse, soit des soupapes thermostatiques fonctionnant de la même manière, mais lorsque la température de l'ambiance à refroidir a suffisamment baissé. Il y a lieu de ne pas confondre ces vannes thermostatiques avec les vannes à surchauffe constante dont nous avons parlé plus haut et dont le rôle n'est pas du tout le même.

Vanne thermostatique dite à deux températures. (fig. 49)

Cette vanne est composée d'un tiroir qui découvre plus ou moins une lumière communiquant avec l'aspiration du compresseur lorsque la température de l'ambiance tend à monter.

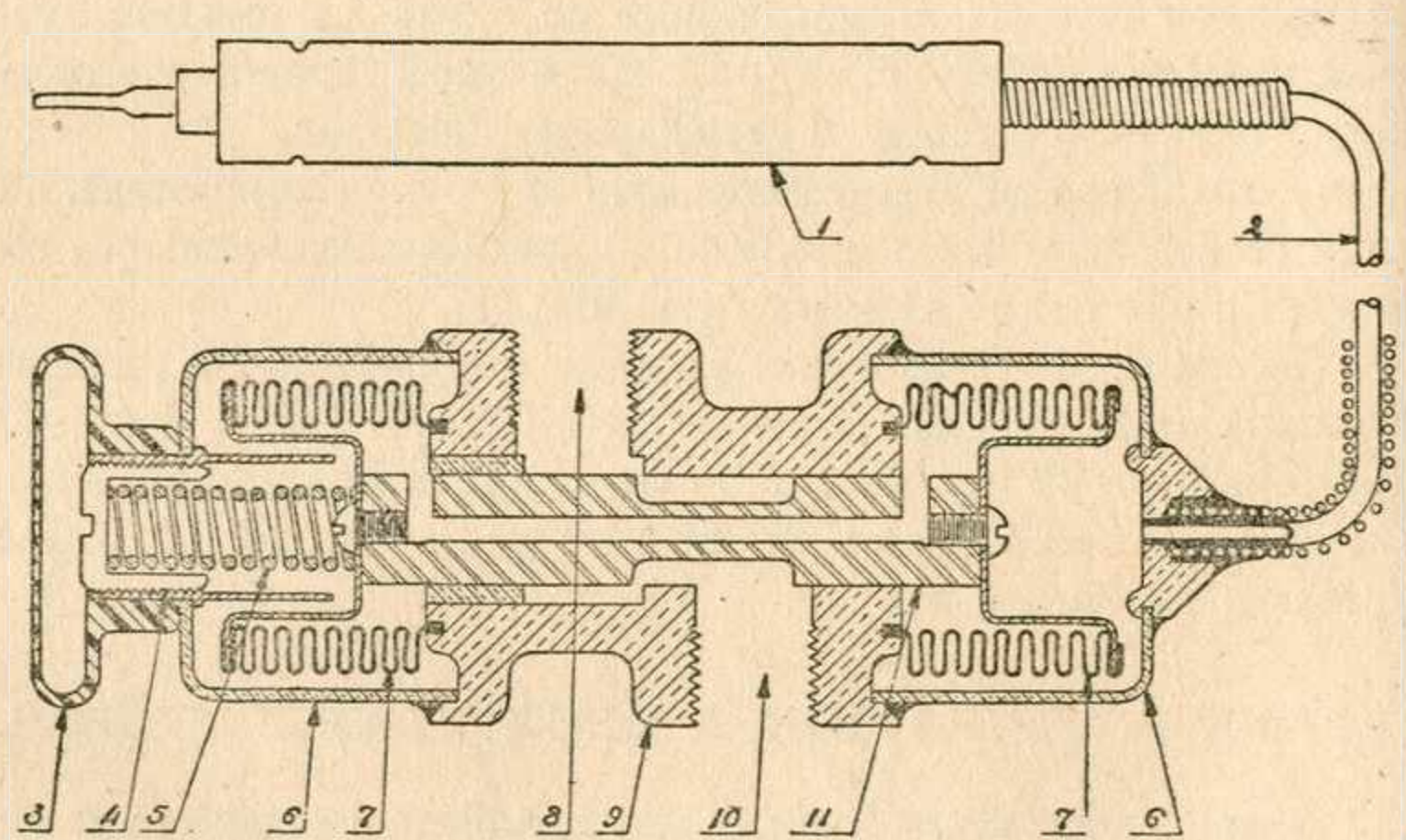


Fig. 49. — Vanne thermostatique à deux températures.

C'est donc une vanne modulante automotrice équilibrée à fonctionnement très doux et très précis. On en comprendra aisément le fonctionnement en étudiant le schéma de la fig. ci-dessus (fig. 49). Elle se place évidemment sur le départ du fluide détendu, à la sortie de l'évaporateur. Son bulbe prend généralement la température de l'ambiance (réglage à posteriori) ou,

parfois, celle de l'évaporateur lui-même (réglage à priori). Le corps de vanne doit être placé de préférence en dehors de la capacité à refroidir.

Vanne à pression constante

Analogue, comme principe, à ce détendeur automatique, mais placé sur le gaz (tandis que le détendeur automatique est monté sur l'arrivée de liquide) cette vanne coupe l'aspiration dans l'évaporateur quand sa pression (donc sa température) est atteinte. C'est également une vanne modulante automotrice, mais actionnée par la pression et non la température.

Ces deux appareils règlent bien le point de coupure, mais, n'ayant pas de dispositif de différentiel, ne permettent pas de régler le point d'ouverture de la vanne. Ils n'assurent donc pas le dégivrage automatique de l'élément. Il ne faut donc les employer que lorsque le givrage est physiquement impossible (refroidissement de liquides, tirages de bière, etc.).

Barostat.

Au contraire, le barostat (fig. 50 et 51) est à différentiel réglable et assure ce dégivrage. Dans l'appareil de la fig. 50, on règle le différentiel en agissant sur le cône 8 qui serre plus ou moins les billes fixant la tige dans ses positions d'ouverture ou de fermeture. Le réglage du point d'ouverture se fait par action sur la tension du ressort 5 au moyen de l'écrou 6.

Le barostat ouvre et ferme brusquement (snap action) sans que l'opercule puisse se fixer dans une position

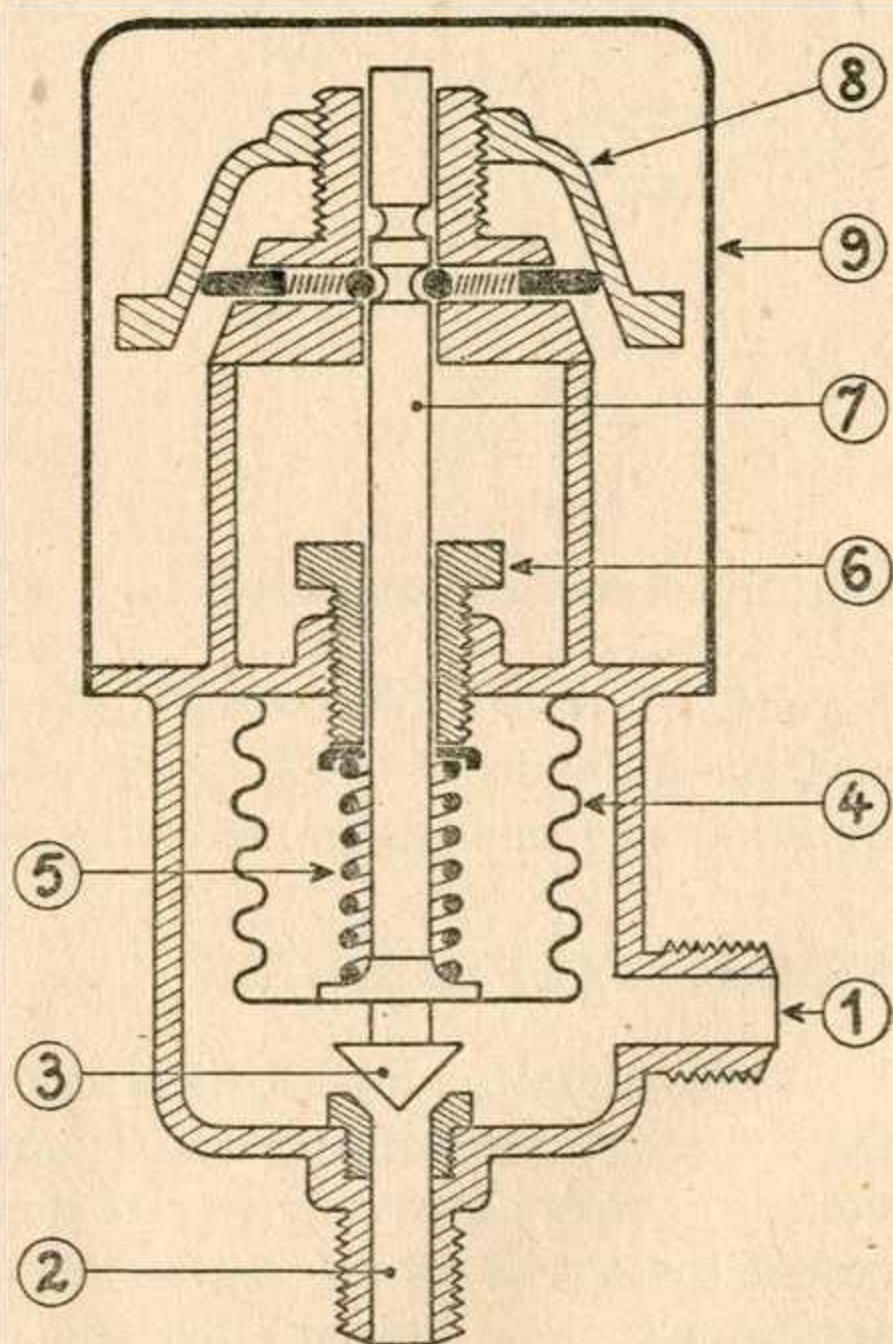


Fig. 50. — Coupe schématique d'un barostat à soufflet.

intermédiaire. Il donne donc lieu à une perte de charge très faible, tandis que les deux appareils précédents freinent sensiblement le mouvement du gaz si bien que la pression d'évaporation est généralement sensiblement plus basse que celle qui est mesurée par le pressostat du groupe. Il y a lieu d'en tenir compte dans le réglage.

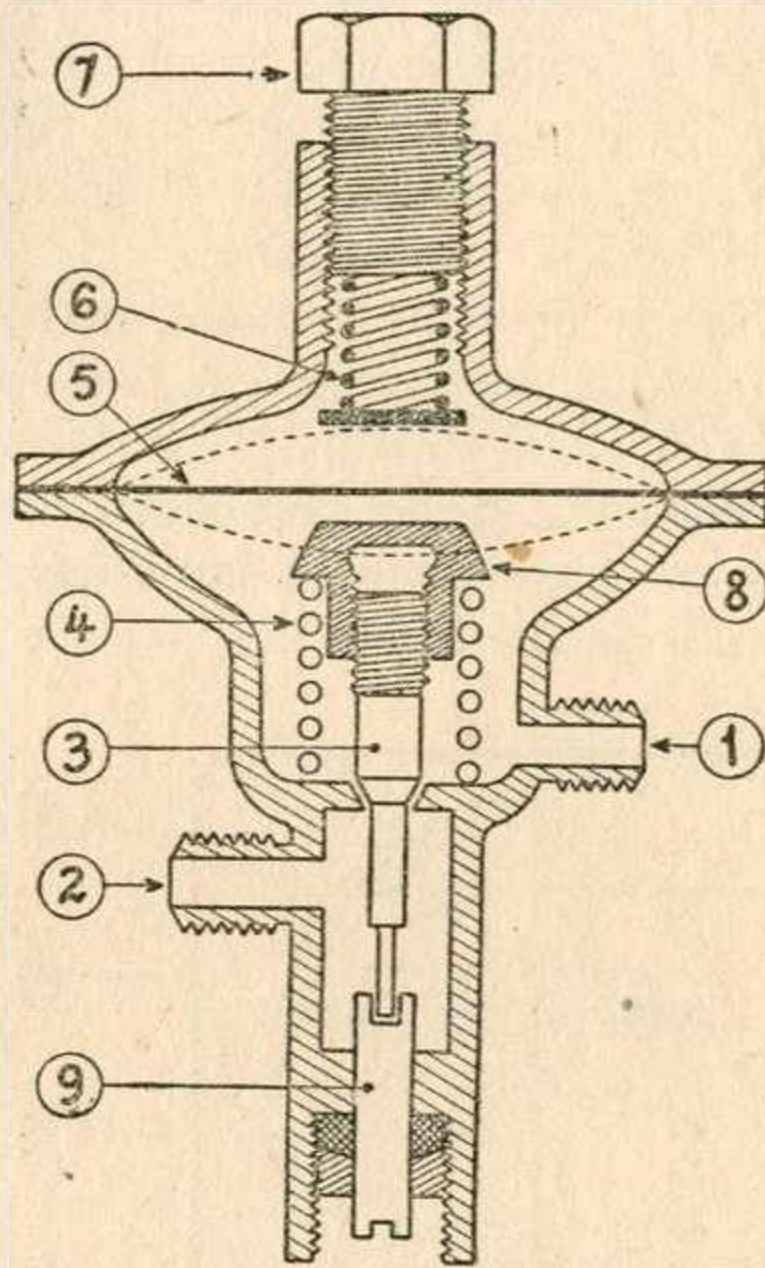


Fig. 51. — Barostat à diaphragme.

Il faut empêcher le gaz de venir se condenser dans l'évaporateur le plus froid pendant les arrêts. Il faut isoler cet évaporateur du côté aspiration afin que la vapeur frigorigène de tout le système ne vienne pas se condenser dans cet évaporateur très froid pendant les périodes d'arrêt. On obtient cet isolement du côté aspiration en y plaçant un clapet de retenue composé généralement d'une bille qui retombe sur son siège lorsque la pression s'équilibre entre amont et aval; c'est ce que les Américains appellent la check-valve (voir fig. 50). Rien n'empêche d'appliquer le même principe pour un nombre quelconque d'évaporateurs en

parallèle, à des températures différentes, il n'y a alors qu'une certaine difficulté de réglage au moment de la mise en route, question que nous examinerons plus tard.

SÉPARATEUR D'HUILE.

Dans certaines installations et notamment pour les groupes importants, il est indispensable d'arrêter l'huile avant le receiver, de manière à renvoyer cette huile au compresseur et éviter qu'elle se collecte dans les points froids de l'installation et notamment dans l'évaporateur qui cesserait naturellement de jouer son rôle, sans préjudice des inconvénients que pourrait



présenter le manque d'huile dans la partie tournante de l'ins tallation.

La séparation d'huile se fait généralement en diminuant la vitesse des gaz dans une capacité auxiliaire ou en y provo-

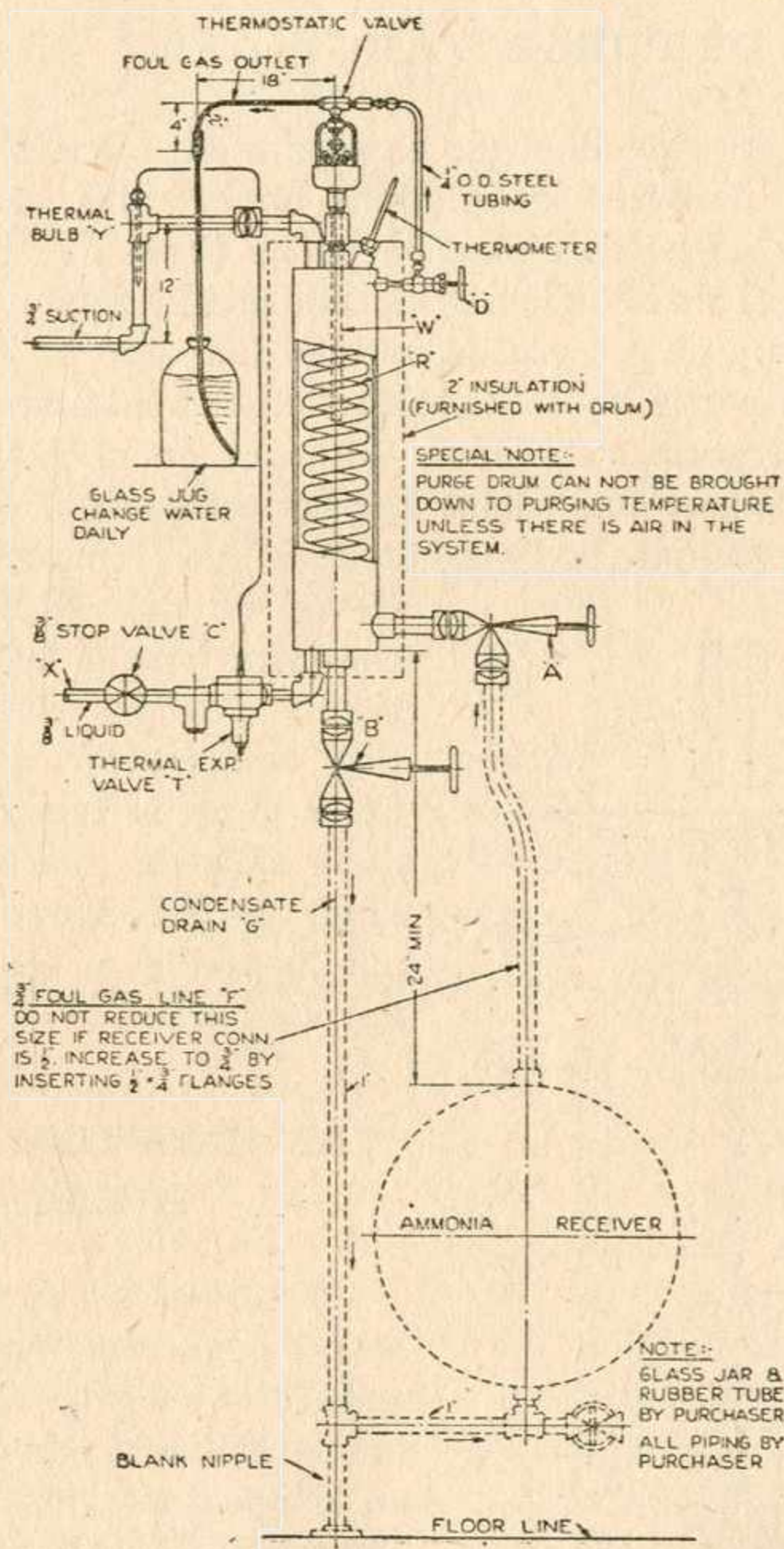


Fig. 52. — Purge d'air automatique.

quant une brusque variation de vitesse et de direction afin que les vésicules graisseuses se déposent sur une paroi et tombent à la partie inférieure de l'appareil. Une vanne automatique

commandée soit par la hauteur d'huile dans le séparateur, soit par le réchauffement de la partie inférieure de cet appareil, ouvre de temps en temps la soupape d'échappement d'huile qui renvoie ce liquide dans le carter par un tube spécial.

SOUPAPE DE PURGE D'AIR. (fig. 52)

Sur un principe analogue au séparateur d'huile, nous pourrions placer, dans les installations importantes, une soupape automatique de purge d'air à la partie haute de l'installation. Quand des gaz non condensables sont présents dans le système, la température de ces gaz accumulés dans une petite bouteille spéciale à la partie haute de l'installation tend à se rapprocher de la température extérieure. Utilisant ce phénomène, nous pourrions y placer une vanne thermostatique qui ouvrira une purge d'air lorsque les gaz seront à une température assez

élevée et qui se fermera au contraire lorsque la bouteille se remplira de gaz réfrigérants, à une température plus basse. Cette purge se fait à l'extérieur de la salle des machines et s'il s'agit de gaz ammoniac, dans une bouteille à eau où on le fait barboter.

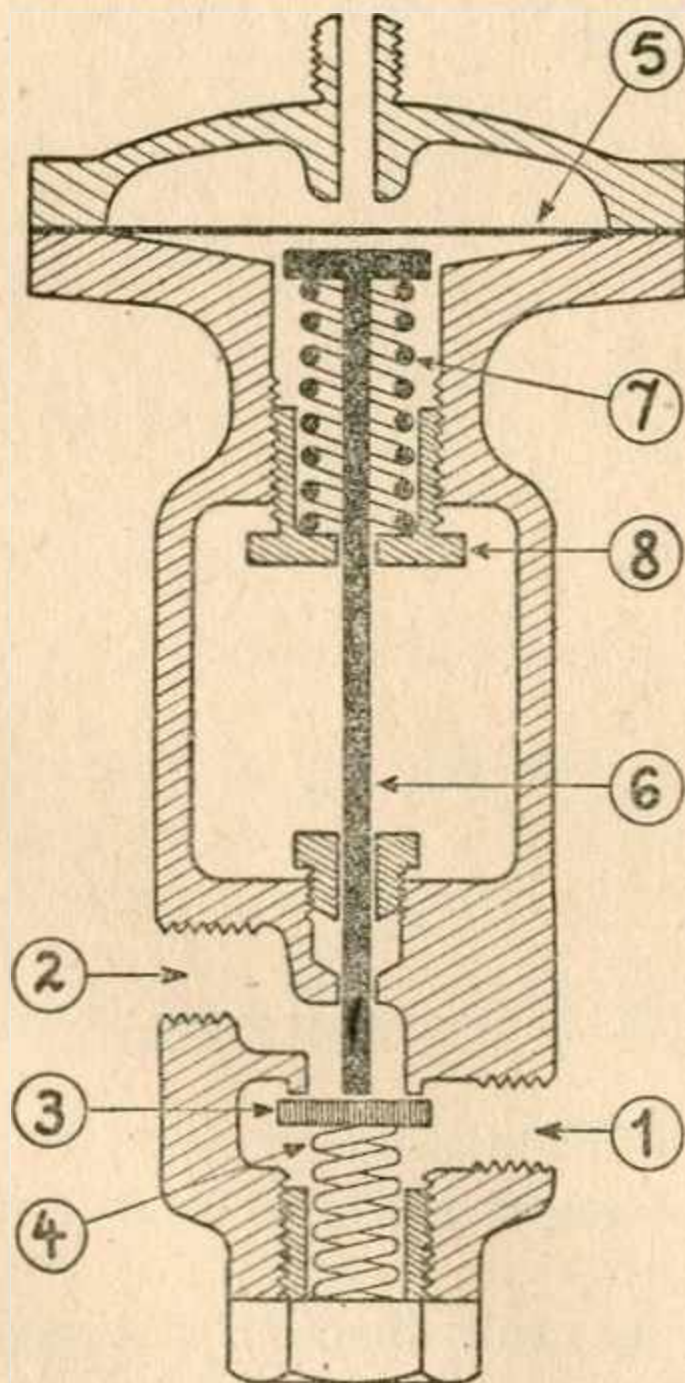


Fig. 53. — Schéma de vanne à eau à pression.

VANNE AUTOMATIQUE A EAU.

Dans les groupes compresseurs à condenseurs refroidis par circulation d'eau, il est économique de n'admettre l'eau au condenseur que lorsque le compresseur fonctionne. On peut obtenir ce résultat de différentes manières : ou bien on interposera sur la canalisation d'eau une soupape électro-magnétique ou motorisée (suivant la dimen-



sion de la tuyauterie) s'ouvrant en même temps que le courant est donné au moteur du compresseur, ou bien on installera sur le refoulement du compresseur un régulateur de pression qui commandera l'ouverture d'une vanne comme il est indiqué ci-dessus, lorsque la pression au refoulement atteint une certaine valeur.

Dans les petites installations on trouve plus simple d'utiliser une vanne pressostatique mécanique recevant la pression du fluide au refoulement et ouvrant le passage de l'eau lorsque cette pression correspond à la pression de marche normale du compresseur. Cette vanne spéciale est représentée à la figure 53.

PRESSOSTAT DE SÉCURITÉ.

Egalement dans les installations à condenseur hydraulique, il est prudent d'installer sur le refoulement du compresseur un pressostat de sécurité interrompant le fonctionnement du groupe lorsque, pour une raison quelconque, l'eau n'arrive pas normalement au condenseur. Cet appareil fonctionne également lorsque par suite d'une fausse manœuvre, un robinet se trouve fermé sur la canalisation de refoulement.

RÉGLAGE SPÉCIAL DES MACHINES FRIGORIFIQUES A ABSORPTION

Dans les machines à absorption, il faut régler le chauffage du bouilleur en fonction de la température d'évaporation. Ceci s'obtient généralement par une vanne thermostatique dont le bulbe prend la température de l'évaporateur (ou de l'ambiance à refroidir) et qui commande l'arrivée du combustible au brûleur du bouilleur. Ceci s'entend naturellement quand il s'agit de combustible gazeux ou liquide. Le même procédé pourrait être utilisé sur la canalisation de vapeur si le chauffage était fait à la vapeur haute pression. En cas de chauffage électrique, la vanne thermostatique serait remplacée par un régulateur de température agissant électriquement sur les relais, commandant la mise en marche ou l'arrêt des résistances chauffantes.



CHAPITRE IV

APPAREILS DE RÉGULATION SPÉCIFIQUEMENT THERMIQUES

Les chaufferies exigent des appareils spéciaux pour l'alimentation en combustible, en eau, et pour assurer la sécurité et l'économie de la combustion.

CHAUFFERIES A CHARBON A CHARGEMENT MANUEL

Dans ce cas, le réglage se réduit à celui de la quantité d'air introduit sous la grille. Rien n'empêcherait cependant de prévoir aussi l'alimentation automatique en eau.

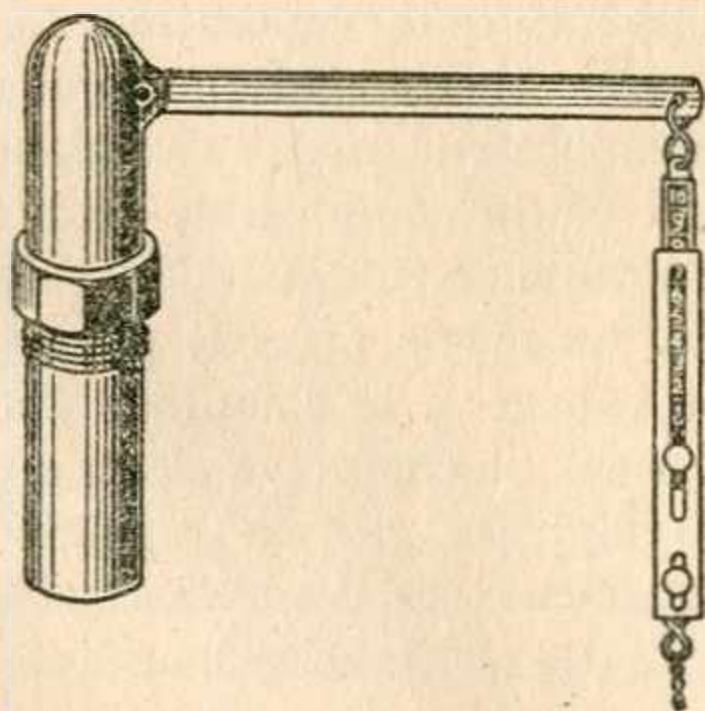


Fig. 54. — Régulateur à cellule thermostatique amovible pour chaudières à eau chaude.

L'entrée d'air dans le cendrier est généralement réglée par un registre léger qui peut être commandé par un thermostat à dilatation (chaudière à eau chaude) ou un régulateur de pression de vapeur (générateur de vapeur). La commande est alors purement mécanique et assurée par une chaînette ou un tringlage (fig. 54). C'est un réglage à priori qui ne donne qu'un résultat très insuffisant

puisqu'il ne tient pas compte automatiquement de la température extérieure ni du degré d'occupation des locaux chauffés.

On peut mettre ce registre sous la domination d'un thermostat d'ambiance, généralement électrique, qui commande alors le registre par l'intermédiaire d'un servo-moteur à deux positions ou modulant. On perfectionne ce système en entraînant en même temps en sens inverse un registre de coupe tirage introduisant de l'air froid à la base de la cheminée quand le cendrier est fermé.

Ce dispositif donne d'excellents résultats à condition qu'il n'y ait pas d'entrée d'air parasite dans le cendrier ou la chambre de combustion, ce qui pourrait arriver dans les chaudières en fonte sectionnées si les éléments n'étaient pas bien calfatés.

Le thermostat doit être mis en série avec un limiteur de température ou de pression sur la chaudière pour en éviter l'emballement lorsque les locaux sont froids.

CHAUFFERIES A GRILLES MÉCANIQUES

L'entraînement de la grille et de la soufflerie est commandée par un servo-moteur agissant sur la vitesse du moteur d'entraînement.

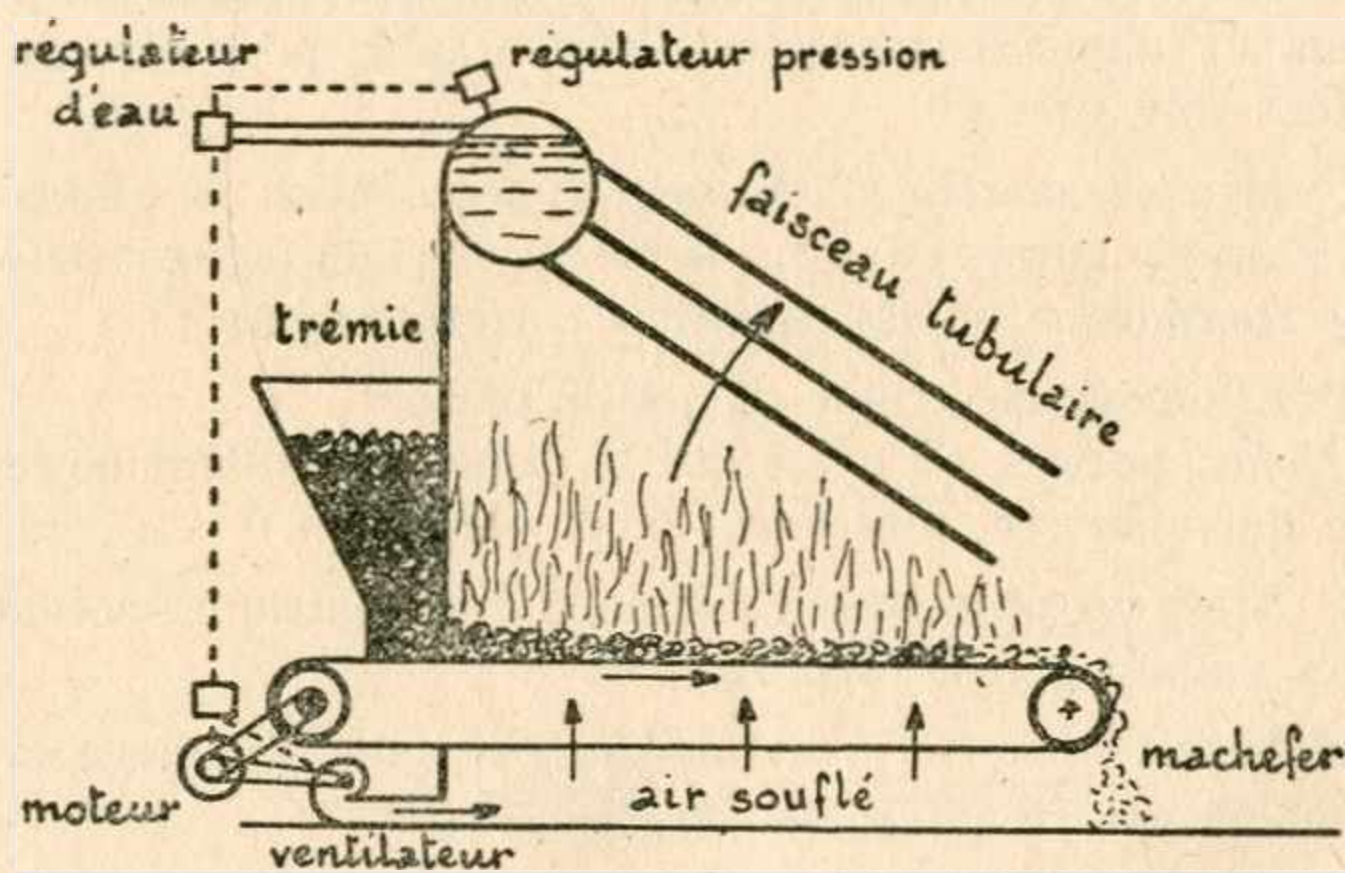


Fig. 55. — Générateur de vapeur à grille mobile.

FOYERS UNDER-FEED. (Voir page 214).

Pour éviter que la chambre de combustion se remplisse de charbon non brûlé en cas d'extinction du foyer, on a imaginé

un pyrostat de cheminée qui actionne le ventilateur lorsque la température des gaz brûlés baisse trop pendant un arrêt prolongé. Il y a ainsi entretien du feu. Si, malgré cela, les gaz se refroidissent au lieu de se réchauffer, ce qui indique l'extinction totale, l'appareil s'arrête, et se met en position de repos et d'alarme.

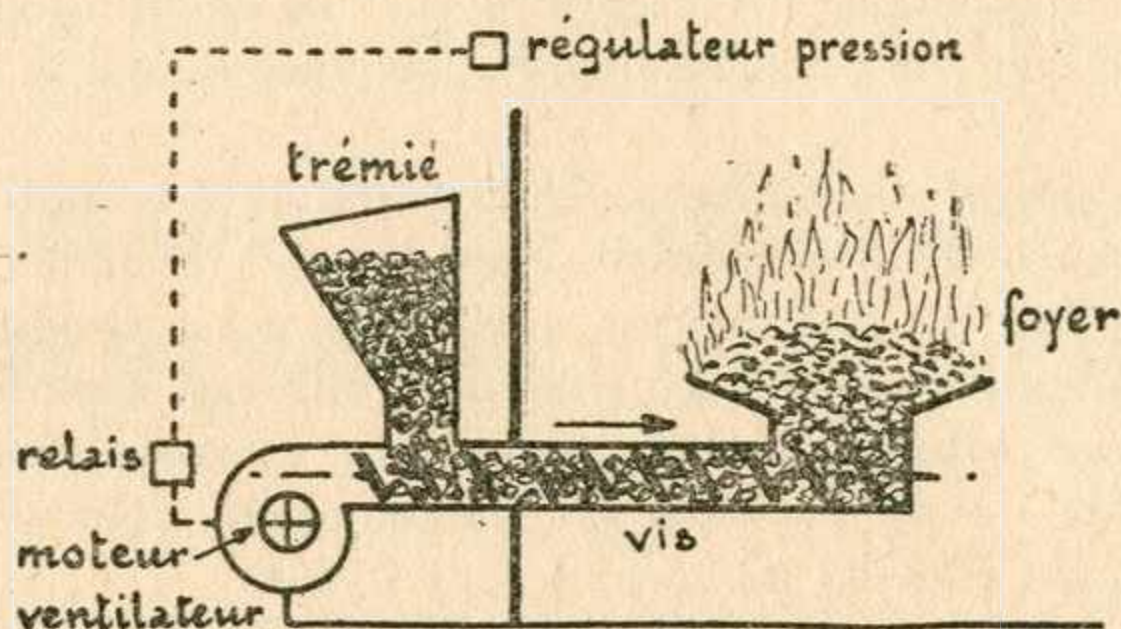


Fig. 56. — Foyer under-feed à vis d'Archimède.

COMBUSTIBLES LIQUIDES

Dans les brûleurs à mazout automatiques réglés par tout ou rien, un appareil spécial est indispensable pour assurer les fonctions suivantes :

1° Mise en marche du brûleur (pulvérisation et alimentation en air comburant) dès que le besoin de chauffage est détecté par le thermostat ou les appareils correspondants ;

2° Allumage électrique du jet de mazout.

(Nota : parfois, on exige que le dispositif d'allumage fonctionne quelques secondes avant la pulvérisation.)

3° Arrêt du processus d'allumage après quelques secondes (parfois l'allumage est permanent) ;

4° Surveillance de la flamme et essai de rallumage si la combustion ne s'amorce pas convenablement ;

5° Arrêt définitif du brûleur en cas d'extinction de la flamme et après un essai de rallumage infructueux ;

6° Alarme dans le cas de « mise en sécurité ».

Ces fonctions sont assurées par un appareil spécial appelé « protectorelais » doublé d'un détecteur de combustion. Nous



donnons à la fig. 57 le schéma d'un des protectorelais les plus employés, de la Minneapolis Honeywell Regulator Co. Le thermostat, ou le dispositif de mise en marche et d'arrêt, est branché en basse tension (24 volts) entre les bornes RWB (on reconnaît à ce branchement à 3 bornes le montage particulier de Minneapolis à 2 contacts étagés (p. 63) le fil de retour étant le W).

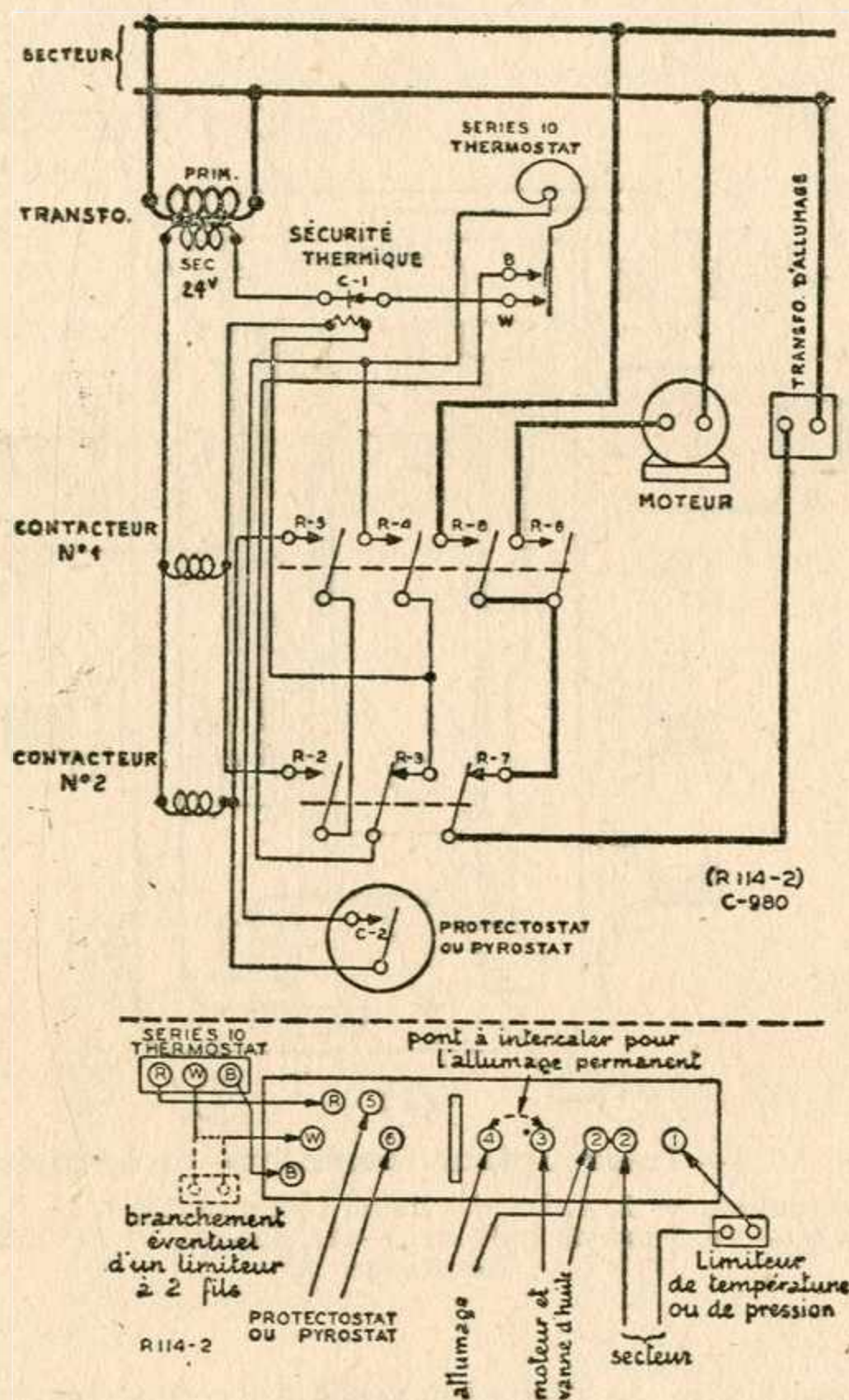


Fig. 57. — Schéma et branchement d'un Protectorelais R. 114

La fermeture de ces circuits entraîne le fonctionnement du relais n° 1 qui met en marche le moteur du brûleur (bornes 1 et 3) et, également, l'allumage électrique provenant du transformateur haute tension branché entre 1 et 4 produisant un



train d'étincelles entre deux électrodes dans le jet de mazout pulvérisé.

Si la flamme se produit régulièrement, les gaz s'échappent chauds à la cheminée ce qui entraîne le fonctionnement du pyrostat à contact placé sur les gaz brûlés. Ce contact court-circuite la résistance chauffante qui n'a pas eu le temps d'échauffer sa bilame et le brûleur continue à tourner.

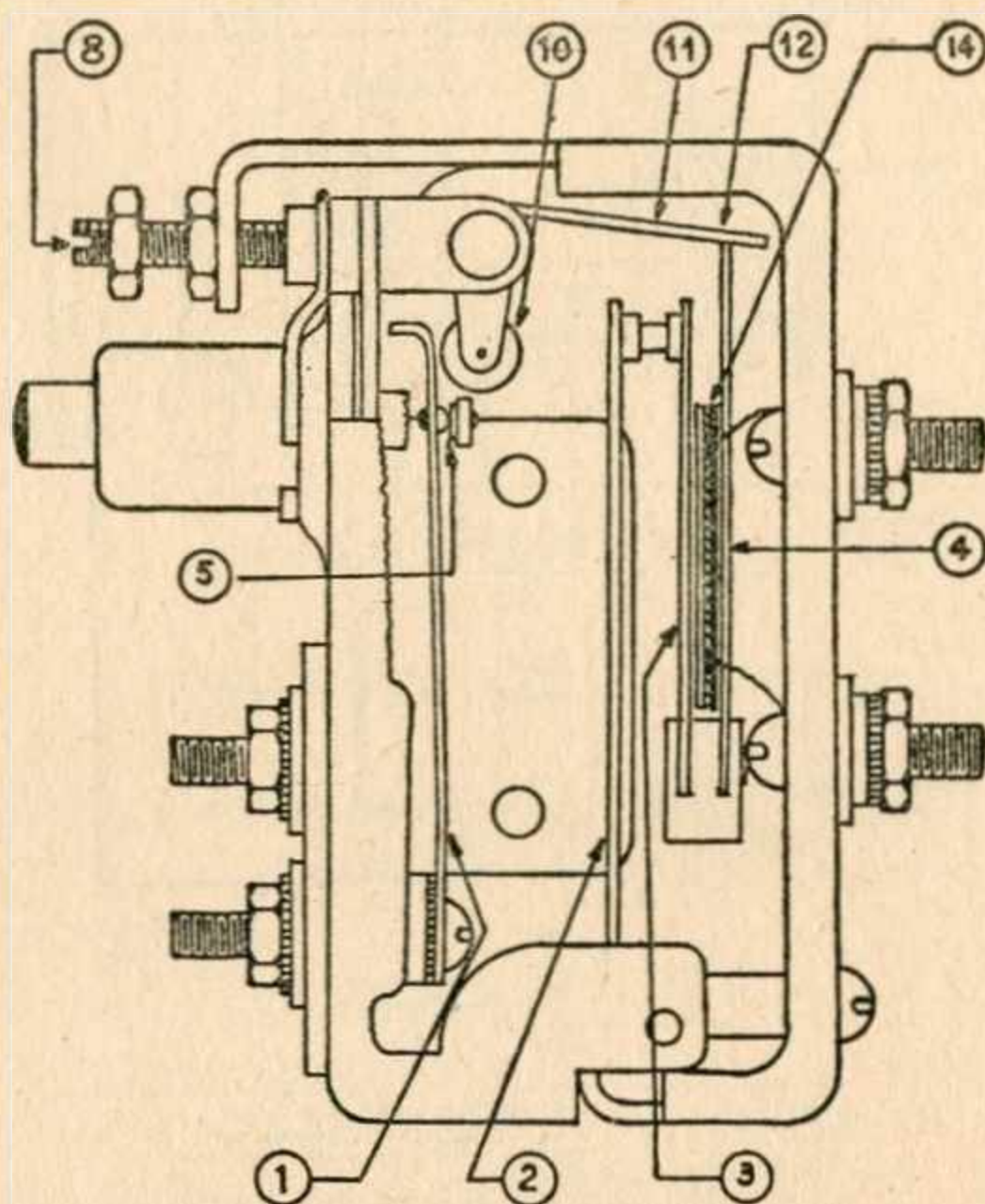


Fig. 58. — Interrupteur thermique de sécurité.

1, 2. Lames de contact. — 3, 4. Bandes métal thermostatique. — 5. Contact. — 8. Vis de réglage. — 10. Rouleau bakélite. — 11. Levier. — 12. Encoche. — 14. Résistance.

Si, au contraire, le pyrostat reste au repos, les gaz évacués à la cheminée restent froids, la résistance chauffante déforme la bilame qui coupe le contact et met le brûleur « en sécurité ». Le brûleur s'arrête et un contact auxiliaire actionne une sonnette d'alarme. L'appareil ne peut être remis en marche que par l'action manuelle sur le bouton de déverrouillage, ce qui oblige le surveillant d'être présent pendant cette opération de remise en marche (fig. 58).

Certains protectorelais possèdent un contact thermique différé qui n'ouvre la vanne d'huile qu'après quelques secondes de marche de l'allumage afin que le mazout pulvérisé s'allume sur des électrodes déjà chaudes.

L'alimentation du transformateur d'allumage est interrompue après quelques secondes de marche, par l'action du pyrostat, sauf dans certains appareils qui sont dits « à allumage permanent ». Dans ce cas, le transformateur est branché en parallèle avec le moteur du brûleur.

Le pyrostat de cheminée (qui se place parfois sur un retour de flamme de la chaudière, ou même sur une porte de la chambre de combustion) est d'un fonctionnement assez lent. Il est, en effet, gêné par l'inertie thermique de toute la chaudière qui accumule beaucoup de chaleur dans son briquetage. D'autre part, et en sens inverse, son échauffement est ralenti par les entrées d'air secondaire dans la chambre de combustion par toutes les fuites qui peuvent exister entre les éléments ou dans la boîte à fumée. On a donc cherché un autre appareil plus rapide et c'est ainsi qu'on a donné la préférence au « protec-

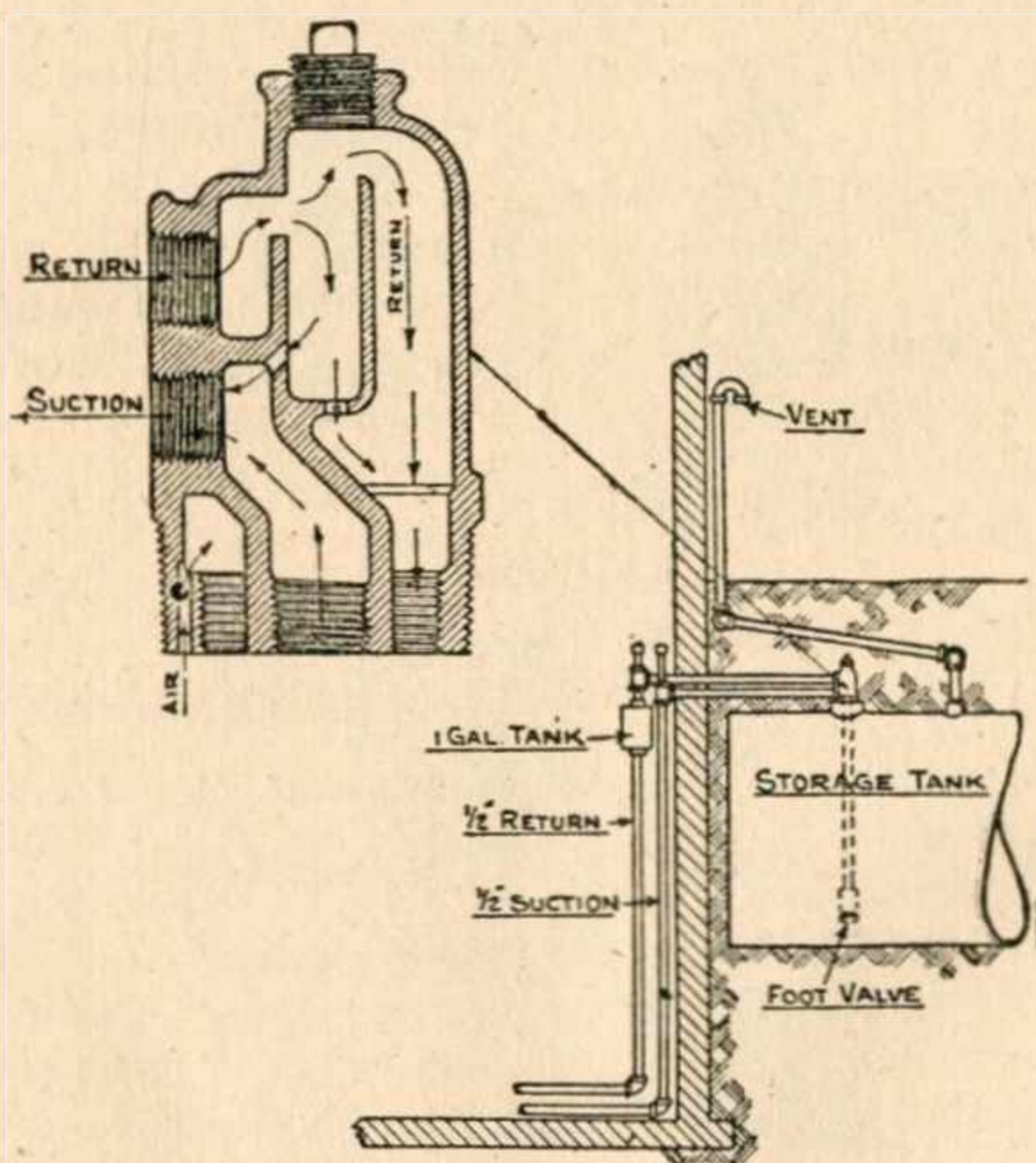


Fig. 59. — Système anti-siphon à désamorçage.

tostat Minneapolis ». Il est composé d'une membrane plane bimétallique recevant le rayonnement calorifique et qui se bombe brusquement quand il est chauffé par la flamme éclairante du mazout. Cette déformation entraîne l'établissement de son contact (v. fig. 62). Le protectostat se place de manière que son axe coupe l'axe de la flamme du brûleur, afin d'être soumis à son rayonnement direct. C'est un appareil très robuste et sûr qui se généralise de plus en plus.

VANNES ANTISIPHON.

Lorsque le brûleur est placé en contre-bas des citernes de stockage de mazout, on peut craindre un écoulement de fuel-oil dans le foyer ou dans la chaufferie par siphonnage pendant les arrêts du brûleur. Pour l'éviter, on place sur la tuyauterie d'aspiration une soupape à ressort ou à poids qui ne s'ouvre que sous l'action d'une forte dépression. La vanne est donc normalement fermée et ne se soulève que lorsque la pompe du brûleur aspire.

D'autres dispositifs antisiphon ont été également utilisés, créant une entrée d'air désamorçant le siphon (v. fig. 59 et 60).

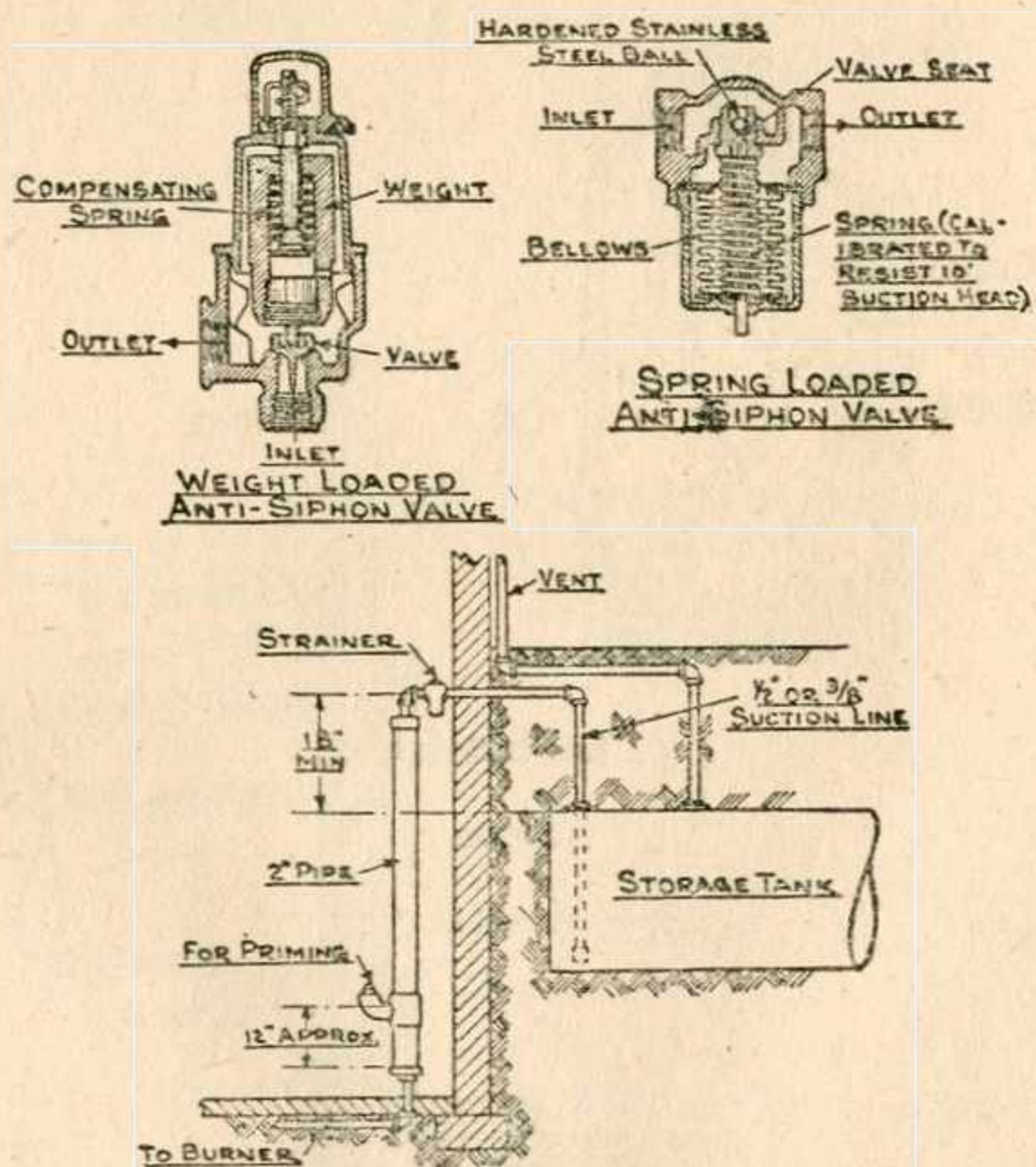


Fig. 60. — Anti-siphon à dépression.

COMBUSTIBLES GAZEUX

APPAREILS DE PROTECTION.

Dans le chauffage au gaz, il faut s'assurer que l'allumage se fait bien à chaque fois que la vanne s'ouvre et dans ce but on prévoit généralement une veilleuse permanente au gaz qui est chargée de rallumer la flamme du brûleur principal à chaque fois qu'il est alimenté. Dans certains appareils, cette veilleuse peut se rallumer automatiquement par une étincelle électrique. Dans d'autres systèmes, la veilleuse permanente allume elle-même une deuxième veilleuse plus puissante qui ne fonctionne que pendant la période très courte de rallumage. Une variante de ce dernier procédé consiste à prévoir une veilleuse fonctionnant à petit débit pendant les périodes d'extinction du brûleur mais dont la flamme s'augmente brusquement d'une manière importante lorsque le brûleur principal va commencer à être alimenté.

Dans tous les cas, il faut qu'un appareil automatique surveille en permanence la flamme de la veilleuse et empêche l'ouverture de la vanne principale si, pour une raison quelconque, la veilleuse s'est éteinte.

Dans certaines installations industrielles fonctionnant par tout ou peu ou au moyen d'un servo-moteur modulant, on a pu supprimer complètement la veilleuse, mais alors il faut que l'appareil de protection surveille constamment la flamme et coupe l'arrivée du gaz si elle venait à s'éteindre.

Pour cette surveillance de la flamme, un certain nombre de procédés sont utilisables et nous allons passer en revue rapidement ceux qui l'ont été réellement :

a) Appareils à dilatation mécanique.

Si l'on plonge dans la flamme de la veilleuse un barreau métallique dilatable, on pourra se servir de sa contraction par refroidissement pour couper un circuit électrique, lors de l'extinction de la flamme. Il suffit pour cela d'employer un barreau résistant à la température de la flamme (environ 600°) et dont la masse calorifique ne soit pas trop forte pour que le refroidissement se fasse assez vite. On a avantage aussi à placer le

barreau dans le courant d'air froid alimentant le brûleur, toujours pour accélérer le refroidissement.

Ce système a été très utilisé au début du développement du chauffage au gaz et nous donnons comme exemple la figure 61, l'une des utilisations d'ailleurs encore largement utilisées aux U.S.A. Dans cet appareil, on voit que la contraction du barreau dilatable agit en même temps sur le contact électrique et sur la soupape à gaz qui alimente la veilleuse pilote elle-même.

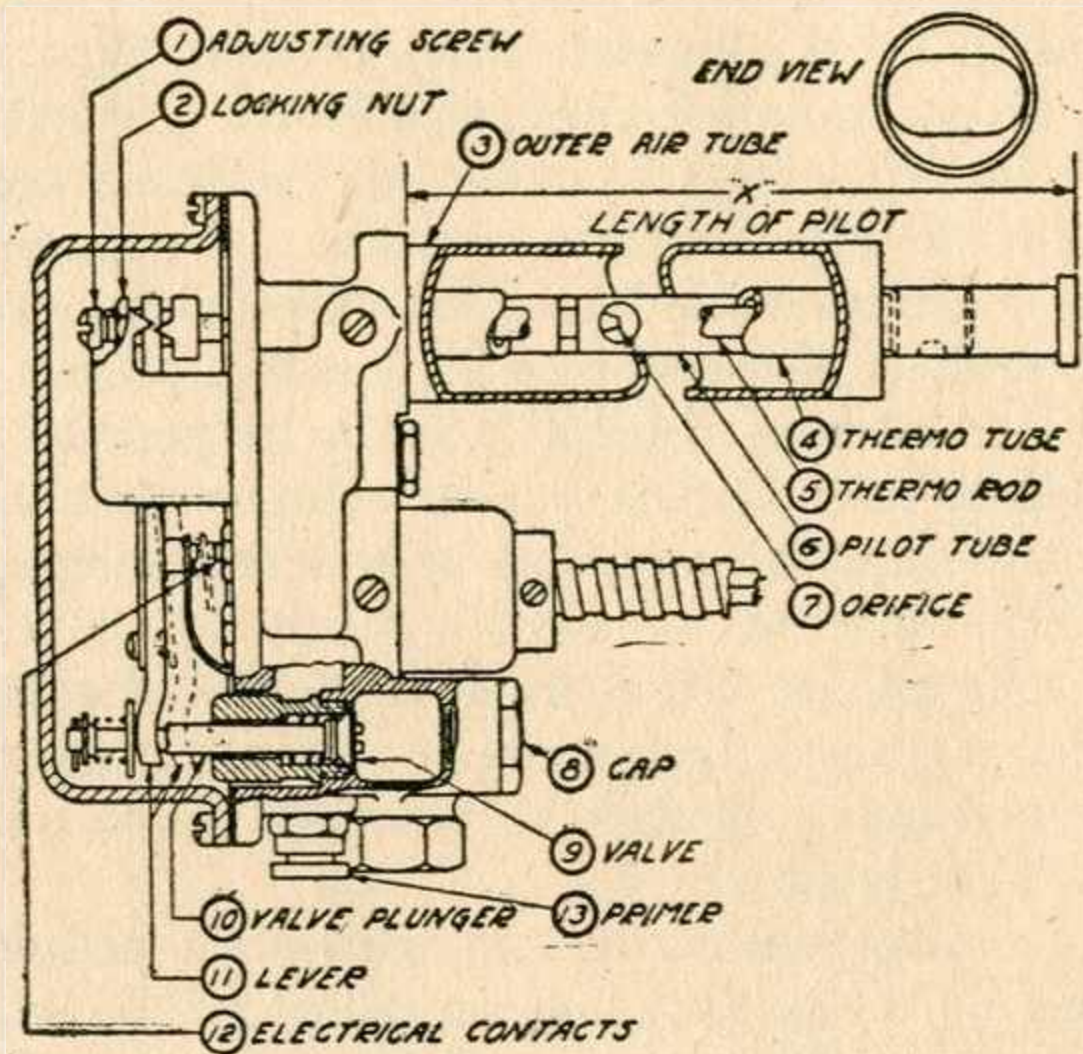


Fig. 61. — Veilleuse automatique mécanique.

Par ce moyen, on peut sans crainte prévoir une veilleuse de consommation relativement grande puisqu'en cas d'extinction elle cesse d'être alimentée en même temps que le brûleur principal et on n'aura pas à craindre l'accumulation de gaz dans la chambre de combustion. Pour le rallumage, il est indispensable que la personne responsable appuie à la main sur le bouton de rallumage pendant les quelques secondes nécessaires au réchauffement du barreau après allumage de la veilleuse.

Ce type d'appareil est très robuste. Il peut fonctionner pendant des années sans aucun entretien, mais on a pu lui reprocher une certaine lenteur de fonctionnement. En effet, dans les appareils les mieux construits, il faut environ 20 à 30 secondes pour son refroidissement. On peut juger dans cer-

tains cas que cette période de refroidissement est trop longue et désire la raccourcir.

b) Appareils à chaleur rayonnante.

On a beaucoup utilisé dans le chauffage au mazout des appareils protecteurs basés sur la chaleur rayonnante. Ce sont deux capacités, l'une noircie et l'autre claire soumises au rayonnement de la flamme. Les rayons électromagnétiques infra-rouges étant arrêtés par l'ampoule opaque, celle-ci s'échauffe davantage que l'ampoule claire et l'on peut se servir de la différence de pression du gaz contenu pour couper un circuit électrique. Ce système, mettant en jeu des organes en verre, a été abandonné assez vite à cause de sa fragilité (visa flamme).

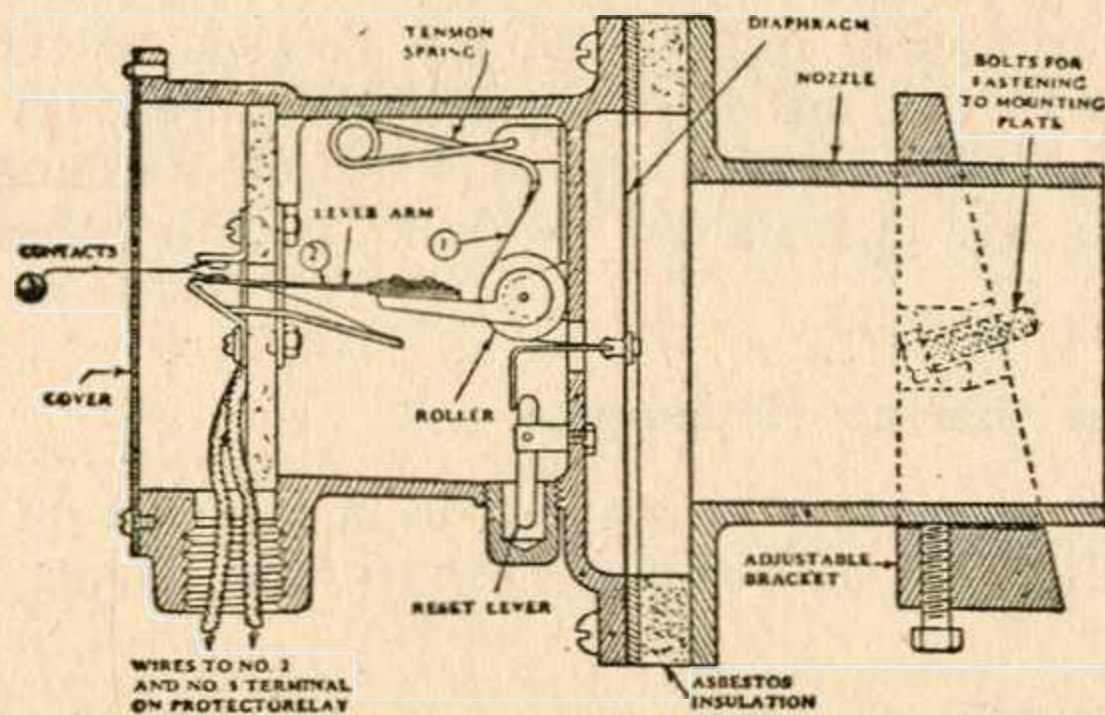


Fig. 62. — Protectostat Minneapolis.

Un deuxième système, entièrement mécanique, est formé d'un disque en tôle mince bi-métallique, dont la déformation sous l'influence des rayons infra-rouges lui donne brusquement une flèche suffisante pour actionner un interrupteur à rupture brusque (fig. 62). Ce système donne de très bons résultats avec la flamme de mazout, qui est très éclairante, puisqu'elle contient des particules de carbone libre qui rayonnent une grande partie de la chaleur de la flamme. Par contre, avec le gaz d'éclairage propre, en flamme bleue, le rayonnement est très faible, parce que toute l'énergie calorifique est contenue dans les gaz de combustion avec un rayonnement très faible. Dans ce cas, les parois de la chambre de combustion rayonnent généralement davantage que la flamme elle-même et l'appareil est en

défaut puisque ce n'est pas la flamme qui agit sur lui, mais les revêtements de la chambre de combustion. On a donc dû abandonner ce système dans le chauffage au gaz.

c) Cellules photo-électriques.

On pourrait assez facilement plonger dans la flamme du gaz un cône de magnésie ou de terres rares qui devient vivement lumineux lorsque la flamme le lèche et qui produirait ainsi suffisamment de rayons lumineux pour agir sur une cellule photo-électrique. Il suffirait alors de déceler ces rayons lumineux par une cellule au sélénium et la faire agir sur un relais électronique d'amplification.

Ce système est généralement jugé trop compliqué et trop fragile dans la pratique. On voit, en effet, qu'il nécessite un cône lumineux assez fragile, soumis à l'action destructrice de la flamme et aux manœuvres parfois brutales du personnel d'entretien. Enfin le relais électronique n'a qu'une durée limitée et nécessite une alimentation constante pour le chauffage du filament.

d) Couples thermo-électriques.

Si l'on place dans la flamme de la veilleuse ou dans la flamme principale la soudure chaude d'un couple thermo-

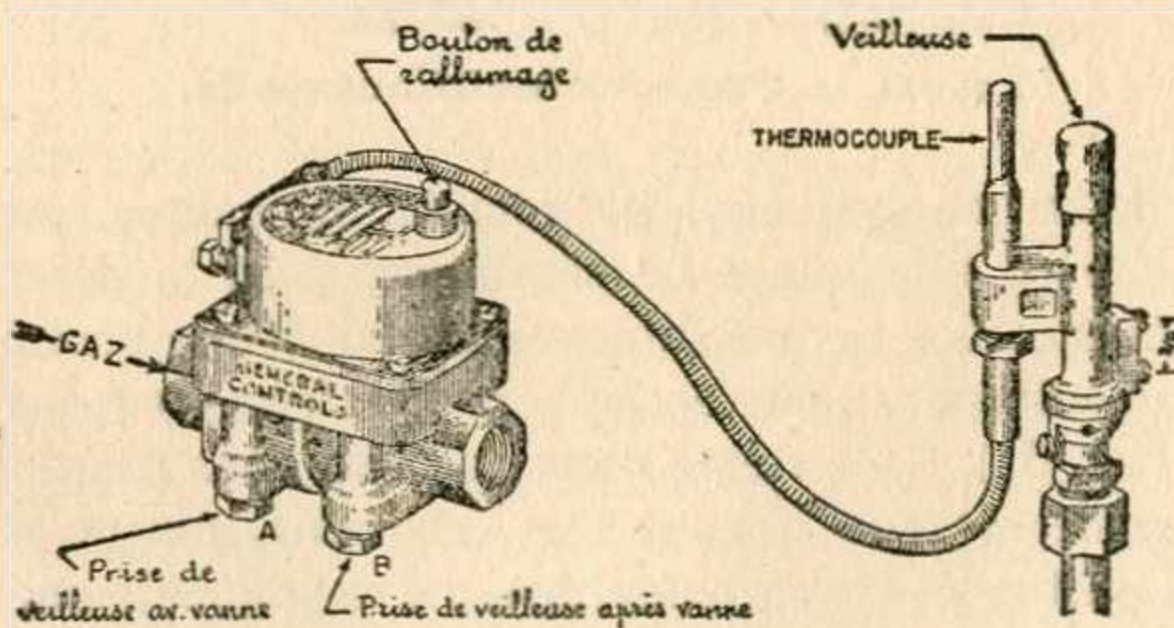


Fig. 63. — Soupape à gaz à thermo-couple.

électrique, on produit ainsi un courant à très faible voltage, suffisant pour actionner l'électro-aimant d'un relais. Ce système a été très développé durant ces dernières années et paraît en ce moment avoir la faveur des techniciens. Les couples utilisés

sont généralement au chromel-alumel, ils résistent bien à la température. On utilise soit un couple unique, soit une série d'une douzaine de couples donnant alors une différence de potentiel relativement importante (300 millivolts pour 600°). Le relais doit être composé de gros fils de cuivre ainsi que les fils de connection ; les contacts doivent être très larges, toutes les connections doivent être soudées pour diminuer les résistances intérieures qui prennent, vu la faible différence de potentiel, une importance énorme. La soudure froide est placée dans le courant d'air afin de s'échauffer aussi peu que possible. La vitesse de réaction de ces appareils est très grande : 5 à 10 secondes au refroidissement.

e) Appareils basés sur la conductibilité électronique de la flamme.

On sait que les gaz incandescents sont très fortement ionisés et sont, par conséquent, conducteurs de l'électricité, tandis que les gaz froids sont presque complètement isolants. Si donc on place une électrode dans la flamme, le circuit est fermé entre cette électrode et la masse, constituée par le tuyau

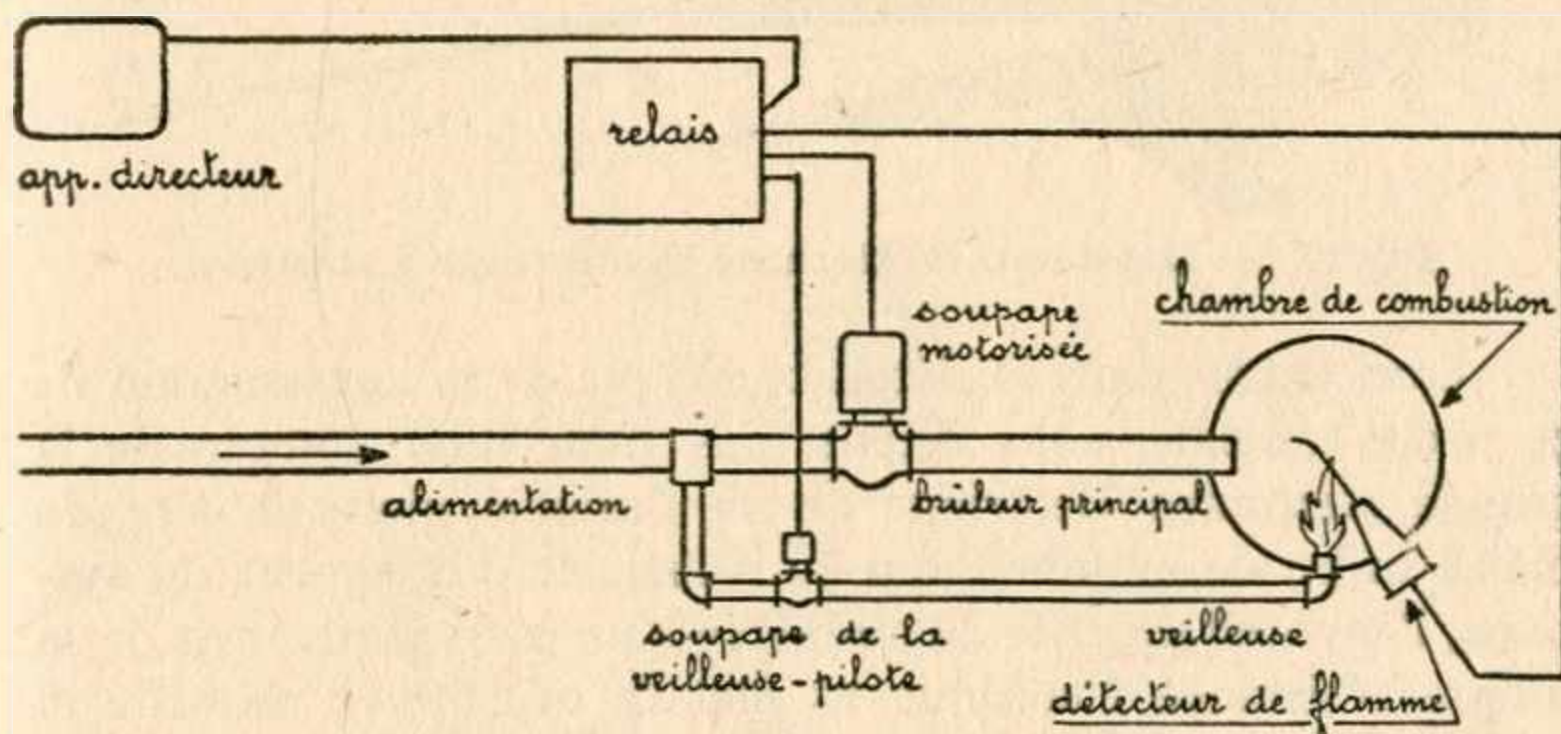


Fig. 64. — Protectoglo « Brown ».

d'arrivée du gaz, aussitôt que la flamme apparaît. On s'est servi de ce principe pour réaliser des appareils de protection extrêmement sensibles, le courant disparaissant sans retard dès que la flamme s'éteint. La flamme est néanmoins relativement résistante et on est obligé d'appliquer une amplification constituée généralement par une lampe unique dont la fragilité est

moins grande que le relais électronique qui serait nécessaire sur une cellule photo-électrique. Pratiquement, on a fait des lampes très robustes supportées par un culot élastique et dans lequel le filament est suffisamment gros pour ne pas risquer de détérioration rapide. Certaines lampes n'ont même pas besoin de filament de chauffage. Ce dispositif permet de commander un auto-rallumage de la flamme par l'étincelle électrique. On temporise légèrement le fonctionnement de l'appareil pour éviter une réaction trop rapide lorsque la flamme de la veilleuse vacille (temporisation de une seconde). Par conséquent, en cas de défaut de la flamme de la veilleuse (ou de la flamme principale s'il s'agit d'un brûleur progressif) il y a tout d'abord essai de rallumage électrique, puis si cet essai n'est pas suivi de résultats, mise en sécurité du brûleur au bout de quelques secondes par l'action d'un relais thermique temporisé. En même temps, un signal acoustique fonctionne et avertit le personnel de garde.

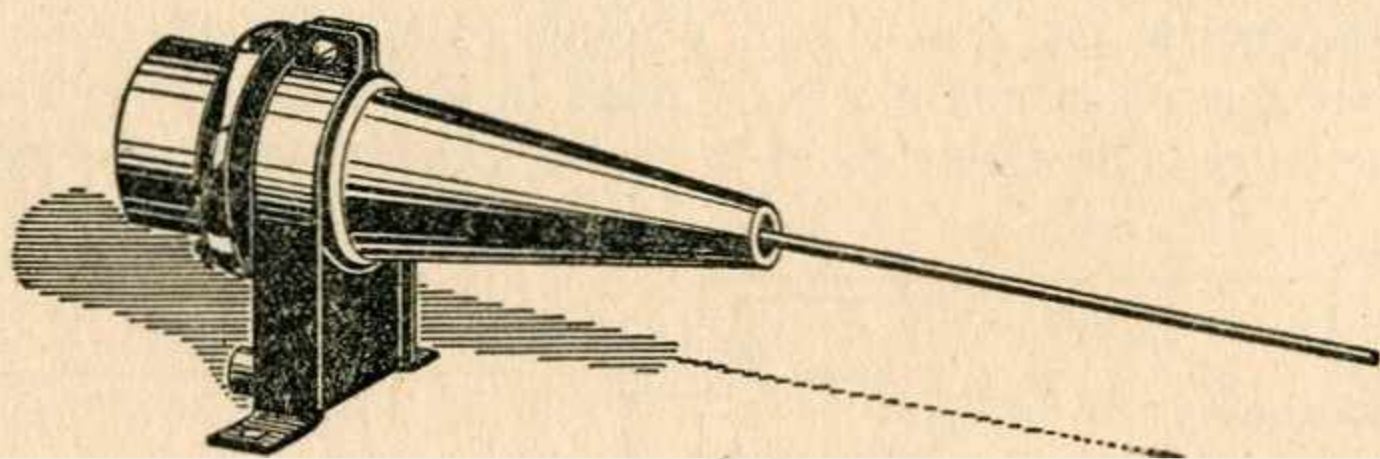


Fig. 65. — Détecteur de flamme Protectoglo « Brown ».

Sans entrer dans le détail technique de la construction de ce protecto-relais, nous dirons que, pour tenir compte de la grande résistance électrique de la flamme, pouvant être du même ordre de grandeur que la résistance d'isolement du système, l'appareil procède de lui-même à un essai permanent de sa propre résistance électrique et met le brûleur en sécurité si cette résistance devient trop faible, ce qui pourrait arriver par le dépôt de suie carbonneuse ou d'eau entre l'électrode et la masse.

En résumé, par l'un des quatre procédés *a*, *b*, *d*, *e*, et plus particulièrement par les dispositifs *a*, *d* ou *e*, nous avons le moyen de détecter l'absence de flamme et de nous opposer au fonctionnement de la vanne du brûleur principal lorsque la veilleuse s'est éteinte.



Dans les petites installations, on se contente de placer cet appareil de protection en série avec la vanne de modulation. Dans les installations importantes, au contraire, on préfère laisser fonctionner indépendamment l'appareil de modula-

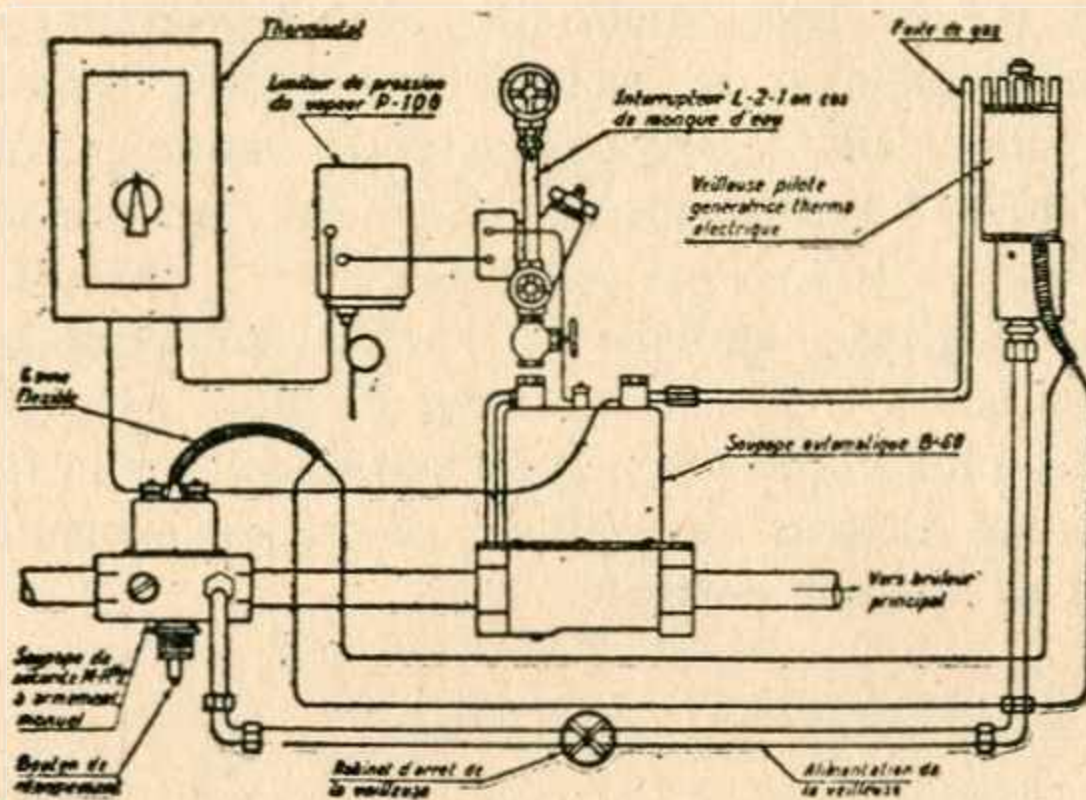


Fig. 66. — Modulation et sécurité d'un chauffage au gaz.

tion sous la dépendance du thermostat ou de l'appareil correspondant. Le dispositif de protection est alors entièrement indépendant et commande une vanne à fermeture étanche placée en série sur la canalisation de gaz (v. fig. 66).

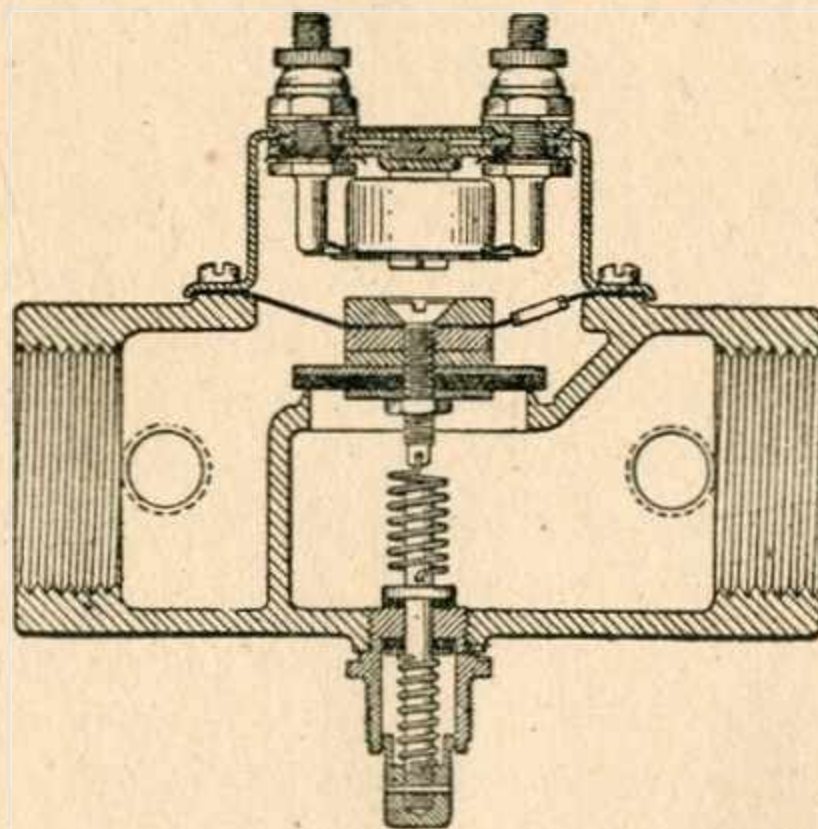


Fig. 67. — Soupape de sécurité, alimentée par le courant d'un couple thermo-électrique.



Sur les petites installations de chauffage central ou des radiateurs, on a réalisé des ensembles compacts servant à la fois à la protection et à la modulation. Certains de ces appareils sont alimentés par une batterie de piles sèches, ce qui évite toute relation avec le réseau électrique. Dans d'autres cas, on se sert même directement du courant produit par le couple thermo-électrique de sécurité pour faire fonctionner la vanne de modulation. Dans ce cas, cette vanne est une simple vanne de fuite et la soupape principale est mue par la pression du gaz (voir fig. 67). Nous pensons que ce dispositif doit être réservé aux petites installations, d'autant plus que les risques de mauvais contact, risques qui sont d'autant plus grands que la f.é.m. est plus faible, ne permet pas de placer le thermostat à une certaine distance du brûleur, ce qui est cependant indispensable à sa marche correcte.



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
--------------------	---

CHAPITRE PREMIER

LA RÉGULATION AUTOMATIQUE

Définition de l'automatisme.....	11
Terminologie	15
Problème de la régulation	17
Appareils à action directe.....	17
Appareils à action indirecte du type « tout ou rien »	19
Appareils à action indirecte du type proportionnel.....	24
Asservissement	27
Emplacement des appareils de régulation.....	29
Régulation à posteriori	29
Régulation à priori	31
Fonction isolante d'un mur d'immeuble	32
Appareils de régulation dans les industries thermiques	37
Appareils directeurs.....	38
Appareils d'exécution.....	38
Appareils de sécurité	39
Résumé du principe de la régulation automatique.....	40

CHAPITRE II

ÉTUDE GÉNÉRALE DES APPAREILS DE RÉGULATION

Appareils thermostatiques.....	42
Étude particulière du thermostat.....	42
Thermostat à mercure sous verre.....	43
Thermostat à liquide sous verre	48
Thermostats à dilatation de liquide sous enveloppe métallique... ..	49
Thermostats à gaz	50
Thermostats à tension de vapeur saturante	51
Thermostats à dilatation métallique.....	54
Appareils à bilame	56
Organes de liaison.....	58
Thermostats à résistance électrique	64
Thermostats à couple thermo-électrique	66
Thermostats pneumatiques	67
Thermostats potentiométriques	69
Intérêt de l'alimentation des thermostats en courant basse tension.....	70
Thermostat à fonctionnement accéléré	70

Discussion sur la valeur des indications du thermomètre	74
1° Prise de la température de l'air d'un local	74
2° Mesure de la température d'un corps solide	75
3° Mesure d'une température de rayonnement	76
4° Mesure d'une température résultante	76
Thermostat à changement de programme	80
Appareils régulateurs de pression.....	81
Régulateurs d'humidité	83
Réglage de la vitesse des fluides.....	85
Réglage des débits des fluides.....	85
Réglage des quantités de chaleur	85
Analyseurs de gaz	86
Appareils chronométriques	86
Appareils à échappement mécanique.....	87
Appareils à remontage électrique	88
Appareils à échappement électrique	89
Appareils à mouvement synchrone	89

CHAPITRE III

APPAREILS DE RÉGULATION SPÉCIFIQUEMENT FRIGORIFIQUES

Appareils destinés au remplissage d'un évaporateur.....	91
Réglage de la détente	94
Vanne pressostatique	94
Vanne de réglage de surchauffe	95
Dérangements des vannes à surchauffe constante	100
Essai de la vanne automatique de surchauffe	102
Vanne d'aspiration à deux températures	103
Vanne thermostatique dite à deux températures	104
Vanne à pression constante.....	105
Barostat.....	105
Séparateur d'huile.....	106
Soupape de purge d'air	108
Vanne automatique à eau	108
Pressostat de sécurité.....	109
Réglage spécial des machines frigorifiques à absorption	109

CHAPITRE IV

APPAREILS DE RÉGULATION SPÉCIFIQUEMENT THERMIQUES

Chaudières à charbon à chargement manuel.....	110
Chaudières à grilles mécaniques	111
Foyers under-feed	111
Combustibles liquides.....	112
Vannes antisiphon	116
Combustibles gazeux	117
Appareils de protection.....	117
Appareils à dilatation mécanique.....	117

Appareils à chaleur rayonnante.....	119
Cellules photo-électriques	120
Couples thermo-électriques.....	120
Appareils basés sur la conductibilité électronique de la flamme.	121

CHAPITRE V

APPAREILS DE RÉGULATION MODULANTS

Compensation	128
Pompage.....	130
Choix entre la régulation par tout ou rien et la régulation modulante	131
Appareils modulants électriques.....	132
Montage flottant	133
Système flottant à impulsions	133
Systèmes modulants à pont de Wheastone et similaires	135
Mélange de différentes impulsions.....	136
Action d'une résistance dans une des branches du circuit	138
Asservissement compensé	139
Compensation mécanique	140
Asservissement électrique Régulec.....	140
Asservissement thermique Siemens.....	141
Dispositif A. R. E. de la Compagnie des Compteurs	141

CHAPITRE VI

APPAREILS D'EXÉCUTION

Servo-moteurs pneumatiques	143
Servo-moteurs électriques à deux positions	145
Electro-aimant	145
Vannes électro-magnétiques	147
Servo-moteurs rotatifs à deux positions.....	151
Servo-moteurs électriques à mouvement proportionnel.....	154
Vannes motorisées	155
Relais et contacteurs	159
Relais électroniques	161
Nombre de pôles au relais de régulation	163

CHAPITRE VII

RÉGULATION AUTOMATIQUE DES INSTALLATIONS FRIGORIFIQUES

Régulation automatique d'un réfrigérateur ménager.....	164
Réglage de la température d'ambiance	164
Réglage du remplissage et de la détente	167
Problème du dégivrage de l'évaporateur.....	168
Problèmes accessoires.....	169
Régulation automatique de la température d'une petite chambre réfrigérée à détente directe.....	169
Réglage de la température de l'ambiance	170
Réglage de la température d'évaporation	172



TABLE DES MATIÈRES

287

Dégivrage automatique.....	172
Choix entre le thermostat et le pressostat de groupe.....	173
Réglage du remplissage de l'évaporateur	174
Réglage de l'humidité de l'ambiance	175
Problèmes accessoires.....	175
Régulation d'une chambre froide à glace.....	177
Régulation d'une chambre réfrigérée par circulation de saumure... Question du dégivrage	179 179
Installation à évaporateurs multiples	180
Cas des grosses installations	183
1) Augmentation de l'espace nuisible du compresseur	184
2) Tuyau de by-pass.....	184
3) Par variation de vitesse du compresseur	185
4) Réglage par mise en marche et arrêt en cascade de plusieurs com- presseurs	185
Installations de conditionnement d'air.....	187
Conditionneurs individuels	190
Conditionnement central	192
Réglage de l'humidité	196
Cas spécial du séchage de l'air par adsorption	197
Cas des machines frigorifiques à jet.....	199
Conditionnement par le cycle Lebre	200

CHAPITRE VIII

RÉGULATION AUTOMATIQUE DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE

Chauffage d'un bain de liquide.....	202
Chauffage d'un local.....	202
a) Réglage à posteriori	202
b) Réglage à priori.....	203
c) Cas spécial d'un chauffage central devant assurer simultanément un service de production d'eau chaude.....	204
d) Cas spécial du chauffage à eau chaude par pompe.....	205
e) Appareils calorimétriques.....	206

CHAPITRE IX

RÉGULATION AUTOMATIQUE DES APPAREILS PROPULSEURS

Appareils propulseurs à vapeur	210
Combustibles solides.....	213
Commande automatique de la chaufferie.....	215
Services auxiliaires.....	216
Appareils de transmission à distance et de sécurité	218
Combustibles liquides.....	219
Combustibles gazeux	222
Propulseurs à combustion interne	224
Moteurs hydrauliques.....	226
Eoliennes	227



CHAPITRE X

ÉLECTRO-TECHNIQUE SPÉCIALE

Qualité spéciale des moteurs électriques utilisés dans l'industrie frigorifique	228
Moteurs à courant continu	230
Moteurs à courant alternatif.....	231
Rotor à double cage	233
Moteur d'induction à coupleur	234
Rotor bobiné à bagues	234
Moteur synchrone	235
Variation de vitesse des moteurs à courant alternatif	237
Cas spécial des petits moteurs	239
Le silence	241
Perturbations radiophoniques	246
Les contrats et les tarifs de vente de l'énergie électrique.....	248
Les tarifs de vente	253
Cabines de transformation.....	254
Les appareils de sécurité.....	255
Les appareils de comptage	259
Note au sujet de l'utilisation de l'ultra-violet et de l'ozone dans les entrepôts frigorifiques	262
Branchement des moteurs électriques	264
Protection des moteurs	265

CHAPITRE XI

DÉPANNAGE DES INSTALLATIONS DE RÉGULATION AUTOMATIQUE

Cas d'une installation frigorifique	268
1) Le compresseur ne tourne plus	269
2) La chambre n'est pas à bonne température, malgré que le compresseur tourne	270
3) L'installation fait un bruit anormal	272
Note sur le montage en série-parallèle des appareils régulateurs inverseurs	273

APPENDICE

I. Sur le retard de fonctionnement des thermomètres et thermostats	275
a) Cas du thermostat plongé brusquement dans une ambiance à la température u	275
b) Cas du thermostat plongé dans une enceinte à température variable	277
II. L'Amortissement des appareils automatiques de régulation. Degés-jours.....	279
Exemple, mettant en œuvre les « degrés-jours »	281
TABLE DES MATIÈRES.....	284



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM



DU MÊME AUTEUR

*Guide du froid et du conditionnement
des locaux*

(Ed. Lesourd.)