

CHAPITRE II  
MESURE DES DILATATIONS

I. — DILATATIONS DES CORPS SOLIDES.

207. Coefficients de dilatation linéaire. — L'expérience montre que, si l'on fait subir à une même barre métallique des variations de température peu considérables, et comprises par exemple entre 0° et 150°, elle éprouve des variations de longueur *sensiblement proportionnelles* à ces variations de température.

On appelle *coefficient de dilatation linéaire* d'une barre solide, le nombre qui exprime l'allongement éprouvé par l'unité de longueur de cette barre, lorsque sa température s'élève d'un degré.

208. Formules relatives aux dilatations linéaires. — Connaissant la longueur  $L_0$  d'une barre à 0°, et son coefficient de dilatation linéaire  $l$ , proposons-nous de calculer la longueur  $L$  de cette barre à  $t$  degrés. — Puisque l'unité de longueur de la barre s'allonge de  $l$  en passant de 0° à 1°, elle s'allonge de  $lt$  en passant de 0° à  $t$  degrés; par suite, la longueur  $L_0$ , pour cette même variation de température, s'allonge de la quantité  $L_0lt$ . La longueur totale de la barre devient donc  $L_0 + L_0lt$ , c'est-à-dire que l'on a

$$(1) \quad L = L_0(1 + lt).$$

La quantité  $1 + lt$  a reçu le nom de *binôme de dilatation*.

Inversement, si l'on connaît la longueur  $L$  d'une barre à  $t$  degrés, et son coefficient de dilatation linéaire  $l$ , pour calculer la longueur  $L_0$  de cette barre à 0°, on aura

$$(2) \quad L_0 = \frac{L}{1 + lt}.$$

Enfin, connaissant la longueur  $L$  à  $t$  degrés, il est facile d'en déduire la longueur  $L'$  à  $t'$  degrés. — En effet, si l'on prend pour inconnue auxiliaire la longueur  $L_0$  de la barre à la température de 0°, on a (1)

$$L' = L_0(1 + l't'),$$

et en remplaçant  $L_0$  par sa valeur (2),

$$(3) \quad L' = L \frac{1 + l't'}{1 + lt} (*).$$

209. Mesure des dilatations linéaires : principe de la méthode de Lavoisier et Laplace. — Diverses méthodes ont été employées pour déterminer les coefficients de dilatation linéaire des corps solides. Voici celle qui a été suivie par Lavoisier et Laplace, en 1782.

Concevons une barre d'environ 2 mètres, placée sur des rouleaux, et s'appuyant par l'une de ses extrémités contre un talon fixe A (fig. 164);

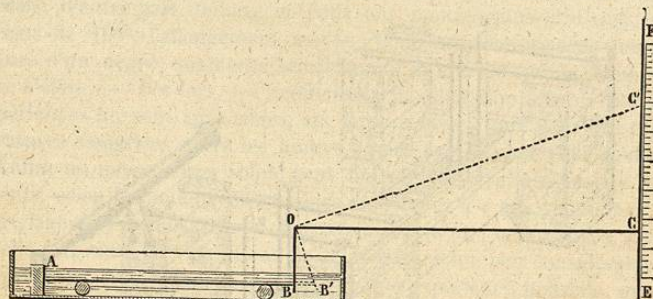


Fig. 164.

par son autre extrémité B, contre la petite branche d'un levier coudé BOC, mobile dans un plan vertical autour du point O. Imaginons, en outre, une échelle EF disposée verticalement en regard du levier. — Soit BB' l'allongement qu'éprouve la barre AB, lorsqu'on la fait passer de 0° à  $t$  degrés; à cette dernière température, le levier prendra la position B'OC'. Les triangles semblables BOB' et COC' donnent

$$BB' = CC' \frac{OB}{OC}.$$

(\*) Au lieu de cette relation entre  $L$  et  $L'$ , on peut en employer une autre, qui n'est qu'approchée. — En effectuant la division  $\frac{1 + l't'}{1 + lt}$ , on obtient pour quotient

$$1 + l(l't - t) - l^2t(t' - t) + \dots;$$

or, le nombre  $l$  étant toujours une fraction très petite, on peut considérer comme négligeables les termes en  $l^2, l^3, \dots$ , à côté du terme en  $l$ , et prendre, pour valeur approchée de ce quotient,  $1 + l(l't - t)$ . Il vient alors

$$(3 \text{ bis}) \quad L' = L [1 + l(l't - t)],$$

relation qui offre avec la formule (1) une analogie remarquable : elle indique que, pour déduire de la longueur  $L$ , correspondante à une température quelconque  $t$ , la longueur  $L'$  correspondante à une autre température  $t'$ , il suffit encore de multiplier

Pour obtenir l'allongement  $BB'$  de la barre, il suffira donc de mesurer le déplacement  $CC'$  de l'extrémité C de la grande branche du levier, sur l'échelle divisée, et de multiplier ce déplacement par le rapport des deux bras de levier  $OB$  et  $OC$ , lequel aura été déterminé une fois pour toutes (\*). — Pour en déduire le coefficient de dilatation linéaire, on divisera la quantité  $BB'$  par la longueur initiale de la barre et par la variation de température  $t$ .

**210. Appareil de Lavoisier et Laplace.** — La barre  $AB$ , reposant sur des rouleaux de verre, et maintenue par deux paires de tiges verticales  $J, J$ , était placée dans une auge métallique, établie entre quatre piliers de maçonnerie  $P$  (fig. 165); dans cette auge, on plaçait d'abord

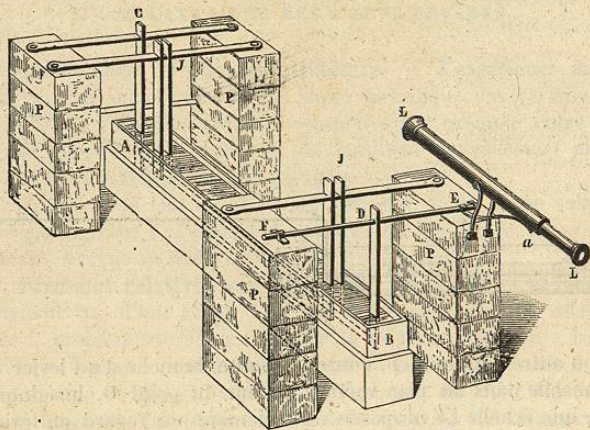


Fig. 165. — Dilatation linéaire des corps solides; appareil de Lavoisier et Laplace.

de la glace fondante, et on la remplaçait ensuite par de l'eau bouillante ou de l'huile. L'extrémité  $A$  s'appuyait contre la tige de verre verticale  $C$ , fixée solidement aux massifs de maçonnerie. L'extrémité  $B$  venait s'appuyer contre une tige semblable  $D$ , qui constituait la petite branche du levier coudé : cette tige était fixée à une traverse horizontale  $FE$  qui, en tournant autour de son axe, entraînait la tige métallique  $Ea$  et la lunette  $LL$ ; enfin, on avait installé, en regard de la lunette, à environ 200 mètres de distance, une règle verticale divisée. Le rayon visuel dirigé suivant l'axe de la lunette constituait ici la

grande branche du levier coudé.

la première longueur par le binôme de dilatation  $1 + l(t - t_0)$ , relatif à la variation de température.

(\*) Dans les expériences de Lavoisier et Laplace, ce rapport était égal à  $\frac{1}{744}$ , en sorte qu'on avait  $BB' = \frac{1}{744} CC'$ . — On voit que l'erreur commise dans la mesure de  $CC'$  était divisée par 744, et  $BB'$  était ainsi déterminé avec une grande précision.

**211. Résultats relatifs aux dilatations linéaires.** — Nous avons admis (207) qu'une même barre solide s'allonge, entre des limites de température suffisamment rapprochées, d'une quantité *constante* pour chaque élévation de température d'un degré. S'il en est ainsi, l'allongement  $BB'$  qu'éprouve la barre  $AB$ , en passant de  $0^\circ$  à  $t^\circ$ , doit être proportionnel au nombre  $t$ ; en d'autres termes, le quotient  $\frac{BB'}{t}$ , qui

exprime l'allongement moyen de cette barre pour une élévation de température d'un degré, entre  $0^\circ$  et  $t^\circ$ , doit être constant, quel que soit  $t$ . Les expériences de Laplace et Lavoisier ont permis de constater qu'il en est ainsi lorsque  $t$  ne dépasse pas  $100^\circ$ .

Mais, d'autre part, Dulong et Petit ont montré plus tard que, au-dessus de  $100^\circ$ , l'allongement moyen, pour une élévation de température d'un degré, augmente sensiblement à mesure que la température s'élève. — Dès lors, les coefficients de dilatation fournis par les expériences ne sont applicables, en toute rigueur, que pour des températures comprises entre les limites de ces expériences elles-mêmes.

Enfin, un même corps solide peut fournir des résultats un peu différents, selon les actions mécaniques auxquelles il a été soumis par le martelage ou l'écroutissage. — Il arrive aussi qu'une même barre, lorsqu'elle a éprouvé des variations de température un peu considérables, ne présente plus, quand on la soumet à une expérience nouvelle, exactement le même coefficient de dilatation.

Le tableau ci-après donne, pour quelques corps solides, la moyenne des résultats obtenus, soit par divers expérimentateurs, soit sur divers échantillons.

COEFFICIENTS  
DE DILATATION LINÉAIRE.

Acier non trempé . . . . .	0,000 011
Acier trempé . . . . .	0,000 013
Argent . . . . .	0,000 019
Cuivre . . . . .	0,000 017
Étain . . . . .	0,000 020
Fer . . . . .	0,000 012
Laiton . . . . .	0,000 018
Or . . . . .	0,000 015
Platine . . . . .	0,000 008
Plomb . . . . .	0,000 028
Verre . . . . .	0,000 008
Zinc . . . . .	0,000 031

**212. Dilatation cubique.** — On appelle *coefficient de dilatation cubique* d'un corps, le nombre qui exprime l'accroissement éprouvé par l'unité de volume de ce corps, lorsque sa température s'élève d'un degré.

Si l'on désigne par  $V_0$  le volume d'un corps à  $0^\circ$ , par  $V$  son volume à  $t$  degrés, et par  $k$  son coefficient de dilatation cubique, on a la relation

$$(1) \quad V = V_0 (1 + kt),$$

que l'on établirait en raisonnant comme pour la relation analogue, relative aux dilatations linéaires (208). — On en déduit

$$(2) \quad V_0 = V \frac{1}{1 + kt}$$

Enfin, si l'on désigne par  $V$  le volume du corps à  $t'$  degrés, on a

$$(3) \quad V = V_0 \frac{1 + kt'}{1 + kt} (*)$$

Nous aurons souvent à faire usage de ces formules.

**213. Relations entre les densités d'un même corps à différentes températures.** — Les densités d'un même corps, à différentes températures, sont inversement proportionnelles aux volumes qu'il occupe. En effet, si l'on désigne par  $V_0$  et  $D_0$  le volume et la densité d'un corps à  $0^\circ$ , par  $V$  et  $D$  son volume et sa densité à  $t$  degrés, on a, en écrivant que la masse  $M$  reste la même :

$$M = V_0 D_0 = VD.$$

En remplaçant  $V$  par sa valeur  $V_0 (1 + kt)$ , et supprimant le facteur  $V_0$ , on a :

$$(1) \quad D = \frac{D_0}{1 + kt}$$

On aura de même, à une autre température  $t'$ ,

$$(2) \quad D' = \frac{D_0}{1 + kt'}$$

En divisant les relations (1) et (2) membre à membre, il vient

$$(3) \quad \frac{D}{D'} = \frac{1 + kt'}{1 + kt}$$

c'est-à-dire que les densités d'un même corps, à deux températures différentes, sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation cubique.

**214. Relation entre le coefficient de dilatation linéaire et le coefficient de dilatation cubique d'un même corps.** — Les coefficients de dilatation linéaire des divers corps ayant été déterminés par l'expérience, on peut se dispenser de nouvelles expériences pour déterminer les coefficients de dilatation cubique de ces mêmes corps.

(\*) On démontrerait comme plus haut (note de la page 161) que cette relation peut être remplacée par la relation *approchée* suivante :

$$(3 \text{ bis}) \quad V = V_0 (1 + k(t' - t)).$$

En effet, représentons par  $l$  le coefficient de dilatation linéaire d'un corps, du fer par exemple, et par  $k$  son coefficient de dilatation cubique. Si l'on imagine un cube de fer ayant pour côté l'unité de longueur à la température de  $0^\circ$ , et si l'on porte sa température à  $1^\circ$ , chaque côté de ce cube acquiert une longueur  $1 + l$ ; donc, si l'on prend l'unité de volume correspondante à l'unité de longueur, le volume de ce cube devient  $(1 + l)^3$ , c'est-à-dire  $1 + 3l + 3l^2 + l^3$ ; par suite, son *accroissement de volume* est exprimé par  $3l + 3l^2 + l^3$ . Or, cet accroissement n'est autre chose que le coefficient de dilatation cubique  $k$ ; on a donc

$$k = 3l + 3l^2 + l^3.$$

Mais, pour tous les corps solides,  $l$  est toujours exprimé par un nombre très petit, comme le montre le tableau de la page 163; le carré  $l^2$  et le cube  $l^3$  sont des nombres encore beaucoup plus petits. Il en résulte que, si l'on calculait  $k$  en remplaçant  $l$  par sa valeur dans les trois termes du second membre, le second et le troisième terme n'augmenteraient le résultat fourni par le premier terme seul, que d'une quantité plus petite que l'erreur commise dans la détermination du premier terme (\*). On doit donc les négliger et on écrira :

$$k = 3l.$$

Dès lors, pour obtenir les coefficients de dilatation cubique des divers corps inscrits dans le tableau précédent, il suffira de multiplier par 3 tous les nombres de ce tableau.

**215. Dilatation des enveloppes.** — Nous avons montré précédemment, par une expérience assez grossière (195), que la capacité d'une enveloppe solide augmente, sous l'action de la chaleur, comme le volume d'une masse de la même substance qui remplirait cette enveloppe. On a pu constater, par des expériences plus précises, qu'il en est toujours rigoureusement ainsi. — Il résulte de là que, si l'on considère un réservoir de verre, par exemple, et si l'on se propose de calculer les variations de son volume intérieur pour des variations de température déterminées, il suffira de connaître le coefficient de dilatation cubique du verre, et de procéder comme s'il s'agissait d'une masse de verre, remplissant la capacité du réservoir.

Mais, pour ce qui est de la connaissance précise de ce coefficient de dilatation, on ne doit pas se contenter de déterminations effectuées sur des échantillons de verres plus ou moins semblables à celui qui

(\*) Effectuons, par exemple, ce calcul pour le fer, dont le coefficient de dilatation linéaire est égal à 0,000 012; on aurait, pour le second et le troisième terme :

$$3l^2 = 0,000\,000\,000\,432; \quad l^3 = 0,000\,000\,000\,001\,728;$$

la valeur de  $l$  n'étant connue qu'à moins d'une unité du sixième ordre décimal près, on doit négliger  $3l^2$  et  $l^3$ , qui sont deux quantités beaucoup plus petites qu'une unité du septième ordre décimal.

forme l'enveloppe dont il s'agit. — Il est nécessaire de déterminer le coefficient de dilatation, sur cette enveloppe elle-même. Cette méthode de détermination est fondée sur la connaissance de la dilatation des liquides, comme on le verra plus loin (220 et 221).

## II. — DILATATIONS DES LIQUIDES.

**216. Dilatations apparentes et dilatations absolues.** — Lorsqu'on chauffe un liquide placé dans un vase (fig. 156), on observe la *dilatation apparente* du liquide dans ce vase (194). — Pour obtenir la *dilatation absolue* du liquide, il semble que le seul moyen consiste à tenir compte de la dilatation du vase qui le contient. La méthode suivante, dont le principe est dû à Boyle, et qui a été appliquée par Dulong et Petit et par Regnault à l'étude de la dilatation absolue du mercure, fournit un résultat indépendant de la dilatation du vase.

**217. Détermination du coefficient de dilatation absolue du mercure : principe de la méthode de Dulong et Petit.** — Deux tubes verticaux AB et CD (fig. 166), ayant un diamètre de quelques centimètres, communiquent entre eux par un tube capillaire deux fois recourbé BEFD, dont la branche EF est horizontale : on y a introduit du mercure. On refroidit à 0° le liquide contenu dans la branche AB, tandis qu'on chauffe à une température connue T celui de la branche CD; il s'établit de part et d'autre une différence de densité, et par suite une différence de niveau. En raisonnant comme on l'a fait pour les vases communicants (78), on voit que les hauteurs des niveaux *m* et *n*, au-dessus de l'axe du tube horizontal EF,

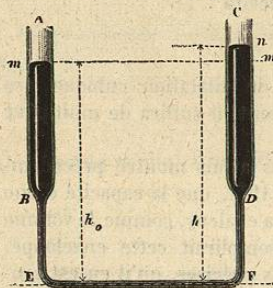


Fig. 166.

doivent être en raison inverse des densités du liquide dans les deux branches. En désignant donc par  $h_0$  et  $D_0$  la hauteur et la densité du mercure à 0°, par  $h$  et  $D$  la hauteur et la densité du mercure à T degrés, on a

$$\frac{h}{h_0} = \frac{D_0}{D}.$$

Mais, si l'on désigne par  $m$  le coefficient de dilatation absolue du mercure, nous avons vu (215) que les densités  $D_0$  et  $D$  sont inversement proportionnelles aux binômes de dilatation correspondants aux températures 0° et T, c'est-à-dire aux quantités 1 et  $1 + mT$ ; on a donc

$$\frac{D_0}{D} = 1 + mT, \quad \text{et par suite,} \quad \frac{h}{h_0} = 1 + mT.$$

De cette équation on tire la valeur de  $m$ ,

$$m = \frac{h - h_0}{h_0 T}.$$

Pour déterminer le coefficient de dilatation absolue  $m$ , il suffira donc de mesurer la température T, la différence de niveau  $h - h_0$ , et la hauteur  $h_0$ . C'est ce qu'ont fait Dulong et Petit.

**218. Appareil de Dulong et Petit.** — Le tube EF, qui réunit les deux branches, était fixé à une règle de fonte MNP (fig. 167), en forme

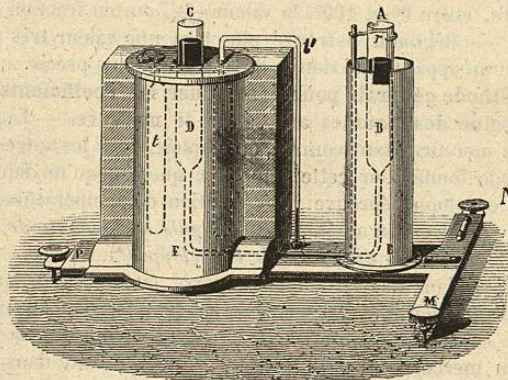


Fig. 167. — Dilatation absolue du mercure; appareil de Dulong et Petit.

de T, que l'on rendait horizontale au moyen de vis calantes et de deux niveaux à bulle d'air placés à angle droit. Le tube AB était environné d'un manchon de fer-blanc, qu'on emplissait de glace fondante : une tige de fer verticale, contenue dans le manchon, se terminait par un crochet dont l'extrémité  $r$  servait de repère. — L'autre branche CD était entourée d'un manchon de cuivre, contenant de l'huile. On chauffait l'huile au moyen d'un fourneau en briques, qui environnait le manchon de toutes parts; un thermomètre à poids  $t$  et un thermomètre à air  $t'$ , comme ceux dont nous indiquerons plus loin le mode d'emploi, donnaient la température de l'huile.

Pour faire une observation, on laissait la température s'élever lentement, jusque près du point qu'on voulait atteindre. On fermait alors toutes les ouvertures du fourneau; le tirage étant arrêté, la température continuait d'abord à monter, puis atteignait un maximum, où elle se maintenait quelque temps stationnaire avant de descendre. On profitait de cet instant pour effectuer les observations; à cet effet, on versait dans la branche AB une petite quantité de mercure à 0°, de manière à élever le niveau dans l'autre branche un peu au-dessus du

manchon, et l'on écartait la glace autour du sommet de la colonne mercurielle en A. Les deux niveaux étant ainsi rendus visibles, on mesurait au cathétomètre les distances verticales du repère  $r$  au-dessus des plans de ces niveaux : la différence de ces distances était la quantité  $h - h_0$ . — En même temps, on notait les indications des deux thermomètres. — Enfin la hauteur du repère  $r$  au-dessus de l'axe du tube EF ayant été déterminée une fois pour toutes, il suffisait d'en retrancher la hauteur du même repère au-dessus du niveau du mercure froid, pour avoir la hauteur  $h_0$ .

Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, entre  $0^\circ$  et  $100^\circ$ , la valeur  $\frac{1}{5550}$ , ou, en fraction décimale, 0,000 180. — Regnault a trouvé plus tard une valeur très peu différente, avec un appareil qui donne des résultats plus précis.

**219. Méthode générale pour déterminer les coefficients de dilatation absolue des liquides autres que le mercure.** — La dilatation absolue du mercure étant connue, on emploie, pour les autres liquides, une méthode fondée sur cette remarque que, lorsqu'un liquide placé dans une enveloppe éprouve une élévation de température, on peut considérer la dilatation absolue comme égale à la somme de la dilatation apparente et de la dilatation de l'enveloppe (\*).

Dès lors, si, dans une enveloppe de verre, on fait une première expérience avec du mercure, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la dilatation de l'enveloppe, puisque la dilatation absolue du mercure sera connue. — Si maintenant, dans ce même vase, on fait une seconde expérience avec un autre liquide quelconque, l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la dila-

(\*) Pour le démontrer, supposons le liquide placé dans une enveloppe graduée en parties d'égales capacités, la capacité d'une division à la température  $0^\circ$  étant prise pour unité de volume. Soit  $V_0$  le volume du liquide à  $0^\circ$ , soit  $V$  le volume apparent à  $t$  degrés. L'accroissement de volume apparent est de  $V - V_0$ ; par suite, l'accroissement apparent éprouvé par l'unité de volume, ou la dilatation apparente, est  $\Delta = \frac{V - V_0}{V_0}$ . Nous allons évaluer cette expression au moyen de la dilatation absolue et de la dilatation de l'enveloppe.

Si l'on désigne par  $K$  la dilatation éprouvée par l'unité de volume de la matière de l'enveloppe entre  $0$  et  $t$ , chacune des divisions observées à  $t$  degrés vaut  $1 + K$ , en sorte que le volume réel de la partie de l'enveloppe occupée par le liquide à  $t$  degrés est  $V(1 + K)$ . D'autre part, si l'on désigne par  $D$  la dilatation absolue de l'unité de volume du liquide entre  $0$  et  $t$ , le volume du liquide à  $t$  degrés est  $V_0(1 + D)$ . Or le volume réel du contenant à  $t$  degrés est égal au volume réel du contenu : donc,

$$V(1 + K) = V_0(1 + D),$$

d'où l'on tire

$$\Delta = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{D - K}{1 + K} \quad \text{et} \quad D = \Delta(1 + K) + K.$$

Or, d'après ce qu'on a vu sur la dilatation des corps solides, le nombre  $K$  est toujours très petit par rapport à l'unité, en sorte que le second membre se réduit sensiblement à  $\Delta + K$ ; c'est ce qu'exprime l'énoncé qui précède.

tation absolue du liquide, puisque l'expérience précédente fournira la dilatation de l'enveloppe.

Pour ces deux opérations, on peut employer soit le procédé du thermomètre à poids, soit le procédé du thermomètre à tige.

**220. Procédé du thermomètre à poids.** — Dulong et Petit faisaient usage d'un vase de verre d'une forme particulière, dit thermomètre à poids. C'est un réservoir de verre R (fig. 168), surmonté d'un tube  $t$  recourbé en forme de crochet, et terminé en pointe. — Avec cet instrument, les deux opérations que l'on vient d'indiquer s'effectuent de la manière suivante :

1° Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe. — L'enveloppe de verre ayant été pesée, on l'empli de mercure (en opérant comme pour un thermomètre ordinaire); on l'environne de glace fondante, en plongeant la pointe dans le mercure, de manière qu'il se remplisse complètement de mercure à la température de  $0^\circ$ , et on le pèse de nouveau : l'accroissement de poids  $P$  est le poids du mercure qui remplit l'enveloppe à  $0^\circ$ . — On introduit alors l'appareil dans une enceinte à une température connue  $T$  (on peut le porter, par exemple, à  $100^\circ$ , en l'introduisant dans l'étuve de la figure 165); une petite quantité de mercure s'échappe par l'extrémité du tube; on la recueille dans une coupelle, et on détermine son poids  $p$ . Le poids du mercure restant est  $P - p$ .

Or, si l'appareil était ramené à  $0^\circ$ , le mercure restant laisserait un espace vide dont le volume représenterait sa contraction apparente dans le verre, en revenant de  $T$  à  $0^\circ$ , ou sa dilatation apparente de  $0^\circ$  à  $T$ ; ce volume serait d'ailleurs précisément celui qui était occupé par le poids  $p$  de mercure à  $0^\circ$ . D'autre part, les volumes peuvent être représentés par les poids de mercure à  $0^\circ$  qui leur correspondent : dès lors,  $p$  représente la dilatation, dans le verre, d'une quantité de mercure représentée par  $P - p$ , pour une variation de température de  $T$  degrés. Par suite, le coefficient de dilatation apparente, ou la dilatation apparente  $\mu$  de l'unité de volume, pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{p}{(P - p)T};$$

en retranchant ce coefficient du coefficient de dilatation absolue du mercure  $\frac{1}{5550}$ , on a le coefficient de dilatation  $k$  de l'enveloppe,

$$k = \frac{1}{5550} - \mu (*).$$

(\*) Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation apparente  $\mu$  du mercure, dans les enveloppes de verre qu'ils employaient, la valeur  $\frac{1}{6480}$ . Il en ré-

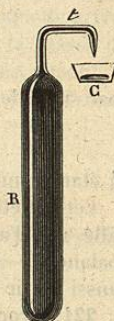


Fig. 168.  
Thermomètre  
à poids.

2° *Détermination du coefficient de dilatation d'un liquide quelconque.* — On reprend la même enveloppe; on y introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue  $d$ , et on répète la même série d'opérations. Soit  $P'$  le poids du liquide qui remplit l'appareil à  $0^\circ$ , et  $p'$  le poids qui s'en échappe à la température  $T'$ ; le coefficient de dilatation apparente  $\delta$  de ce liquide dans le verre est

$$\delta = \frac{p'}{(P' - p')T'};$$

par suite, le coefficient de dilatation  $d$  du liquide est

$$d = \delta + k,$$

$k$  étant connu par l'expérience précédente.

Cette méthode n'exige aucune graduation à effectuer sur l'enveloppe. Elle n'a d'autre limite d'exactitude que celle de la sensibilité de la balance. — On verra plus loin (248) comment le même instrument peut aussi servir à déterminer les températures.

**221. Procédé du thermomètre à tige.** — On prend une enveloppe thermométrique ordinaire, dont nous supposons la tige bien cylindrique et préalablement partagée en divisions d'égales longueurs. On détermine, par une expérience préliminaire, le nombre  $N$  qui représente la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation, en prenant pour unité la capacité d'une division (\*). — On effectue ensuite les deux opérations suivantes :

sulte que le coefficient de dilatation de ce verre était  $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$ , ou sensiblement  $\frac{1}{58670}$ . — Lorsqu'on veut se contenter d'évaluer approximativement la dilatation d'une enveloppe formée d'un verre quelconque, on peut faire usage de ce coefficient; mais lorsqu'il s'agit de recherches précises, il est indispensable de déterminer toujours, en opérant comme il vient d'être dit, la valeur particulière du coefficient de dilatation de l'enveloppe elle-même.

(\*) Voici en quoi consiste cette opération : l'enveloppe thermométrique étant remplie à peu près complètement de mercure, on la place dans la glace fondante, et l'on note la division  $n$  où s'arrête le mercure. On porte ensuite l'instrument sur la balance, et l'on en fait la tare. On fait alors sortir, en chauffant un peu le réservoir, une quantité de mercure telle que, lorsqu'on replacera l'instrument dans la glace, le niveau s'arrête à une division un peu supérieure au zéro de la graduation; on note cette division  $n'$ , et, en reportant l'instrument sur la balance, on détermine la diminution de poids  $p$ . On connaît ainsi le poids  $p$  du mercure qui occupait à zéro  $n - n'$  divisions. Enfin, on vide entièrement l'enveloppe, et la nouvelle diminution de poids  $P$  exprime le poids du mercure qui, à zéro, remplissait l'instrument jusqu'à la division  $n'$ , ou dont le volume était  $N + n'$  ( $N$  étant la capacité du réservoir jusqu'au zéro de la graduation). — Si l'on exprime que les poids  $P$  et  $p$  de mercure sont entre eux comme les volumes qu'ils occupent à zéro, on a :

$$\frac{N + n'}{n - n'} = \frac{P}{p},$$

d'où l'on tire la valeur de l'inconnue  $N$  :

$$N = \frac{p}{p} (n - n') - n'.$$

1° *Détermination du coefficient de dilatation de l'enveloppe.* — On introduit du mercure dans l'enveloppe, de manière que, l'instrument étant plongé dans la glace fondante, le liquide arrive à l'une des divisions inférieures de la tige : soit  $n$  le numéro de cette division;  $n + N$  est le volume du mercure que contient l'enveloppe à  $0^\circ$ . — On porte ensuite l'appareil à une température connue  $T$  (à 100 degrés, par exemple), et on détermine le numéro  $n_1$  de la division à laquelle arrive le mercure;  $n_1 - n$  est la dilatation apparente de toute la masse du mercure, pour une élévation de température de  $T$  degrés. Donc, le coefficient de dilatation apparente  $\mu$ , ou la dilatation apparente de l'unité de volume pour une élévation de température d'un degré, est

$$\mu = \frac{n_1 - n}{(n + N)T};$$

en le retranchant du coefficient de dilatation absolue du mercure  $\frac{1}{5550}$ , on a le coefficient de dilatation de l'enveloppe, savoir

$$k = \frac{1}{1550} - \mu.$$

2° *Détermination du coefficient de dilatation absolue d'un liquide quelconque.* — Dans la même enveloppe thermométrique, on introduit le liquide dont on cherche le coefficient de dilatation absolue, et on lit encore les divisions  $n'$  et  $n'_1$  auxquelles arrive le liquide aux températures  $0^\circ$  et  $T'$ . Le coefficient de dilatation apparente  $\delta$  du liquide est

$$\delta = \frac{n'_1 - n'}{(n' + N)T'};$$

en y ajoutant le coefficient de dilatation de l'enveloppe  $k$ , on a le coefficient de dilatation absolue du liquide,

$$d = \delta + k.$$

Quant aux conditions dans lesquelles on fait cette seconde expérience, il faut remarquer que la température choisie  $T'$  n'est généralement pas celle de  $100^\circ$ ; c'est une température tantôt supérieure, tantôt inférieure, selon la volatilité du liquide sur lequel on opère. — On place l'instrument dans un bain d'eau ou d'huile, contenu dans une caisse rectangulaire dont une des faces est formée par une glace de verre. La température du bain est donnée par un thermomètre à mercure, placé à côté de l'enveloppe thermométrique qui contient le liquide à étudier : de là, le nom de procédé des *thermomètres comparés*, par lequel on désigne cette disposition expérimentale.

**222. Variations du coefficient de dilatation absolue d'un même liquide à diverses températures.** — Lorsqu'on détermine les coefficients

moyens de dilatation absolue d'un liquide entre 0° et des températures de plus en plus élevées, on trouve des nombres qui vont généralement en croissant, surtout lorsqu'il s'agit de liquides volatils.

Isidore Pierre a déduit, d'un grand nombre d'expériences, les valeurs du *coefficient vrai* de dilatation de divers liquides, soit à la température de 0°, soit à la température d'ébullition de chacun d'eux : c'est-à-dire l'accroissement éprouvé par l'unité du volume, en passant, soit de 0° à 1°, soit de la température d'ébullition à cette même température augmentée de 1 degré. — Voici quelques-uns de ces résultats : on remarquera que, pour un même liquide, les nombres de la seconde colonne sont notablement plus grands que ceux de la première.

## COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS

	A ZÉRO.	A LA TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION.	TEMPÉRATURES D'ÉBULLITION.
Alcool . . . . .	0,001 049	0,001 196	78°,5
Éther . . . . .	0,001 515	0,001 647	35°,5
Aldéhyde . . . . .	0,001 654	0,001 827	22°,0
Sulfure de carbone . . . . .	0,001 140	0,001 249	47°,9
Brome . . . . .	0,001 058	0,001 168	63°,0
Chloroforme . . . . .	0,001 107	0,001 320	65°,5

**223. Coefficients de dilatation des liquides très volatils, à des températures très supérieures à leur point d'ébullition normal.** — Lorsqu'on renferme un liquide volatil dans une enveloppe résistante, on peut le porter à une température extrêmement élevée sans que l'ébullition se produise; on peut donc étudier, dans ces conditions, la dilatation du liquide à des températures bien supérieures à celle de son point d'ébullition normal.

Cette étude a été faite par Drion : il a reconnu que le coefficient de dilatation vrai des liquides très volatils va en augmentant très rapidement avec la température, et qu'il peut même atteindre des valeurs égales à deux ou trois fois celle du coefficient de dilatation de l'air. — Voici quelques nombres tirés de ce travail :

## COEFFICIENTS DE DILATATION VRAIS :

	à 0°.	à 50°.	à 90°.	à 150°.
Acide hypoazotique . . . . .	0,001 446	0,002 021	0,005 081	»
Éther chlorhydrique . . . . .	0,001 485	0,002 045	0,002 910	0,005 051
Acide sulfureux . . . . .	0,001 754	0,002 538	0,004 147	0,009 751

**224. Maximum de densité de l'eau.** — Lorsqu'on refroidit simultanément, à partir de 15°, par exemple, un thermomètre à mercure et une enveloppe thermométrique contenant de l'eau, on voit d'abord les liquides baisser à la fois dans les deux instruments; mais, lorsque la température arrive aux environs de 4°, si le niveau du mercure continue à descendre, celui de l'eau remonte. — Il y a donc, aux environs de 4°, une température à laquelle le volume de l'eau passe par un *minimum*; par suite, la densité passe par un *maximum*.

**225. Expériences de Despretz.** — L'expérience précédente, effectuée avec précision, donne directement la température à laquelle le volume *apparent* de l'eau est un *minimum* : pour trouver la température qui correspond au *minimum* de volume *réel*, c'est-à-dire au *maximum* de

densité, il faut tenir compte de la variation de volume de l'enveloppe. — C'est ce qu'a fait Despretz, en étudiant préalablement, comme il a été dit (221), la dilatation de l'enveloppe employée : c'est ainsi qu'il a pu fixer très approximativement à 4° la température du maximum de densité de l'eau.

Il a pu ensuite, au moyen d'un nombre suffisant de déterminations effectuées entre 0° et 100°, déterminer les valeurs de la densité de l'eau, de degré en degré, dans cet intervalle, en prenant pour unité la densité à 4°. — Voici quelques nombres extraits de ce travail :

TEMPÉRATURES.	DENSITÉ DE L'EAU.	TEMPÉRATURES.	DENSITÉ DE L'EAU.
0°	0,999 875	50°	0,995 688
4°	1,000 000	40°	0,992 329
40°	0,999 751	50°	0,988 095
20°	0,998 215	100°	0,958 654

Enfin, en profitant de cette remarque, que l'on peut abaisser jusque vers — 20° la température d'un thermomètre à eau, bien purgé d'air, sans que le liquide se congèle, Despretz a pu constater que l'accroissement de volume, déjà observé pour des températures décroissantes de 4° à 0°, se poursuit au-dessous de 0°, jusqu'au moment où il devient impossible de maintenir l'eau à l'état liquide.

**226. Expérience de Hope.** — On constate, dans les Cours, l'existence du maximum de densité de l'eau, au moyen de l'expérience suivante, qui est due au physicien écossais Hope. — Une éprouvette de verre M (fig. 169) contient de l'eau : deux thermomètres A et B plongent, l'un dans les couches supérieures du liquide, l'autre dans les couches inférieures; le manchon métallique C, qui entoure la partie moyenne de l'éprouvette, contient de la glace. L'eau de l'éprouvette étant primitivement à 10°, par exemple, on voit bientôt les deux thermomètres indiquer un abaissement de température; mais le thermomètre inférieur baisse d'abord plus vite que le thermomètre supérieur, les couches d'eau refroidies acquérant d'abord une plus grande densité, et gagnant successivement le fond du vase. Lorsque B est arrivé à 4°, il demeure stationnaire, tandis que A continue à descendre, d'abord jusqu'à 4°, puis au-dessous de 4°, et jusqu'à zéro. On en conclut que l'eau, à mesure qu'elle se refroidit au-dessous de 4°, au niveau de la galerie C, acquiert des densités moindres et gagne la partie supérieure du vase (\*).

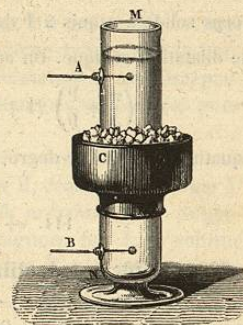


Fig. 169.  
Maximum de densité de l'eau.

(\*) Cette expérience permet de concevoir comment, dans les lacs, la température de