

227. **Appareil de Dulong et Petit.** — Le tube EF, qui réunit les deux branches, était fixé à une règle de fonte MNP (fig. 199), en forme 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

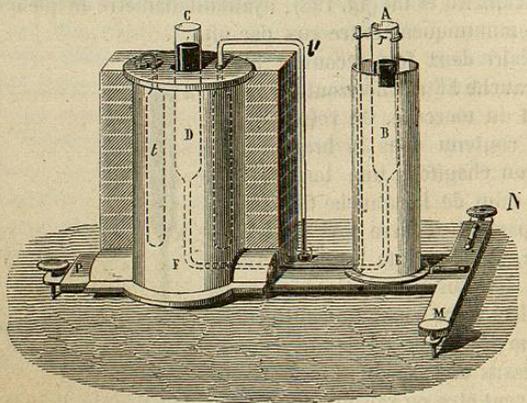


Fig. 199. — Dilatation absolue du mercure; appareil de Dulong et Petit.

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 à monter pendant quelques instants, 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 préalablement refroidi à 0°, de manière à élever le niveau dans l'autre branche de quelques millimètres au-dessus du manchon, et l'on écartait un peu 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 .

228. **Résultat.** — Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation absolue du mercure, entre 0° et 100°, la valeur $\frac{1}{5550}$, ou, en fraction décimale, 0,000 18018. — Regnault a trouvé plus tard une valeur très peu différente, avec un appareil qui donne des résultats plus précis.

229. **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,

(*) Pour le démontrer, supposons le liquide placé dans une enveloppe munie d'un tube gradué en parties d'égales capacités, et convenons d'évaluer tous les volumes en prenant pour *unité* la capacité d'une division à la température 0°. Soit V_0 le volume du liquide à 0°, c'est-à-dire la somme du volume du réservoir jusqu'au zéro de la graduation (volume que nous supposons évalué en divisions du tube) et du nombre de divisions occupées par le liquide à 0°; soit V le volume apparent à *t* degrés, c'est-à-dire la somme du volume du réservoir et du nombre fourni par la lecture sur la tige à cette température. 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 D , est le rapport $\frac{V - V_0}{V_0}$. Nous allons chercher à 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 Δ la dilatation absolue de l'unité de volume du liquide entre 0 et *t*, le volume du liquide à *t* degrés est $V_0(1 + \Delta)$. Or le volume réel du contenant à *t* degrés est égal au volume réel du contenu : donc

$$V(1 + K) = V_0(1 + \Delta),$$

d'où l'on tire

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \frac{\Delta - K}{1 + K}.$$

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 $\Delta - K$: donc

$$D = \Delta - K \quad \text{ou} \quad \Delta = D + K;$$

c'est ce qu'exprime l'énoncé qui précède.

l'observation de la dilatation apparente permettra de calculer la *dilatation 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*.

250. **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 cylindrique R (fig. 200), sur-

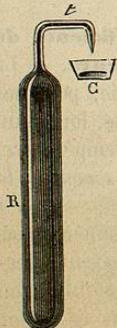


Fig. 200.
Thermomètre
à poids.

monté 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'emplit 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°, et on le pèse de nouveau :

l'accroissement de poids est le poids *P* du mercure qui remplit l'enveloppe à 0°. — On introduit alors l'appareil dans une enceinte à une température connue *T* (on peut le porter, par exemple, à 100°, en l'introduisant dans l'étuve de la figure 192); 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°, le mercure restant laisserait un espace vide dont le volume représenterait sa contraction apparente dans le verre, en revenant de *T* à 0°, ou sa dilatation apparente de 0° à *T*; ce volume serait d'ailleurs précisément celui qui était occupé par le poids *p* de mercure à 0°. D'autre part, les volumes peuvent être représentés par les poids de mercure à 0° 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 *d* de l'unité de volume, pour une élévation de température d'un degré, est

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

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

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

*) Dulong et Petit ont trouvé, pour le coefficient de dilatation apparente *d* du

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 δ , et on répète la même série d'opérations. Soit *P'* le poids du liquide qui remplit l'appareil à 0°, et *p'* le poids qui s'en échappe à la température *T'*; le coefficient de dilatation apparente *d'* de ce liquide dans le verre est

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

par suite, le coefficient de dilatation absolue δ du liquide est

$$\delta = d' + k,$$

k étant connu par l'expérience précédente.

Cette méthode est commode, en ce qu'elle n'exige aucune graduation préalable à effectuer sur l'enveloppe qui doit servir à l'expérience. Elle n'a d'autre limite d'exactitude que celle de la sensibilité de la balance. — Nous indiquerons plus loin (260) comment le même instrument peut également servir à déterminer les températures.

251. **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 au zéro de la graduation, en prenant pour unité la capacité d'une division (*). — On effectue ensuite les deux opérations suivantes :

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

mercure, dans les enveloppes de verre qu'ils employaient, la valeur $\frac{1}{6480}$. Il en résulte que le coefficient de dilatation de ce verre était $\frac{1}{5550} - \frac{1}{6480}$, ou sensiblement $\frac{1}{38670}$. — 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, 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

inférieures de la tige : soit n le numéro de cette division; $n + N$ est le volume du mercure que contient l'enveloppe à 0° . 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* d , ou la dilatation apparente de l'unité de volume pour une élévation de température d'un degré, est

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

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

$$k = \frac{1}{5550} - d.$$

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° et T . Le coefficient de dilatation apparente d' du liquide est

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

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

$$\delta' = d' + k.$$

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° ; 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, pour faciliter

la lecture. 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*, qui caractérise cette disposition expérimentale.

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 :

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

* 252. **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.

M. 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	65,0
Chloroforme	0,001 107	0,001 320	65,5

* 253. **Coefficient 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 suffisamment résistante, il est possible, ainsi que l'a montré Cagniard de Latour, de 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 :

	A 0° .	A 50° .	A 90° .	A 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	0,001 734	0,002 538	0,004 147	0,009 751

254. **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*.

255. **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 (251), 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.

Dans ce même travail, Despretz a déterminé les volumes et les densités de l'eau, de degré en degré, en prenant pour unité le volume et la densité de l'eau à 4°. — Les résultats ont été les suivants:

TEMPÉRATURES.	VOLUME DE L'EAU.	DENSITÉ DE L'EAU.
0°	1,000 127	0,999 873
4°	1,000 000	1,000 000
10°	1,000 269	0,999 731
20°	1,001 79	0,998 215
50°	1,004 53	0,995 688
40°	1,007 73	0,992 529
50°	1,012 05	0,988 093
100°	1,045 15	0,938 654

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.

256. **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. 201) 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 thermo-

mètre 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 (*).

257. **Emploi du thermomètre à poids, pour la détermination du coefficient de dilatation cubique des corps solides.** — Le thermomètre à poids,

dont nous avons fait usage pour étudier les dilatations des liquides (250), a été appliqué par Dulong et Petit à la détermination directe du coefficient de dilatation cubique de quelques corps solides.

On donne au corps la forme d'un petit cylindre, et on l'introduit dans le réservoir, avant de souder à celui-ci le tube qui le surmonte (fig. 202): on remplit l'appareil de mercure (**), et on exécute les mêmes manipulations et les mêmes pesées que précédemment (250). — Pour poser l'équation du problème, nous écrivons que la capacité intérieure de l'enveloppe à T degrés est égale à la somme des volumes du corps solide et du mercure qu'elle contient, à cette température.

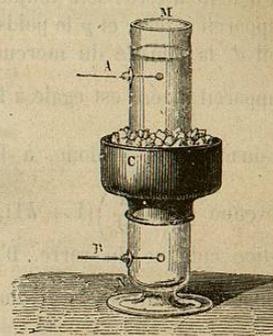


Fig. 201. — Maximum de densité de l'eau.



Fig. 202.

(*) Cette expérience permet de concevoir comment, dans les lacs, la température de l'eau, à partir d'une certaine profondeur, demeure invariablement égale à 4°, soit pendant les chaleurs de l'été, soit pendant les froids de l'hiver. Les variations de température de la surface, qui se font sentir jusqu'à une certaine distance, donnent toujours à l'eau une densité moindre que celle des parties profondes. Il n'y a donc pas de raison pour que la température devienne uniforme dans la masse, par le mélange des diverses couches de liquide.

L'existence du maximum de densité de l'eau, à une température supérieure à 0°, explique aussi la formation des *puits de glace*, c'est-à-dire de ces petites cavités cylindriques que l'on observe à la surface des glaciers. — Au fond de chacune de ces cavités, on trouve généralement un corps solide, comme un fragment de roche. Ce corps, en tombant à la surface du glacier et s'échauffant au soleil, a d'abord fait fondre la glace au-dessous de lui. A mesure que, sous l'action du soleil, l'eau de fusion s'est échauffée un peu au-dessus de 0°, elle est descendue au fond de la cavité et a déterminé la fusion d'une nouvelle quantité de glace; mais alors elle s'est refroidie, est remontée à la surface où elle s'est échauffée de nouveau, et ainsi de suite, en sorte que la profondeur de la cavité a été successivement en augmentant.

(**) Dans les expériences de Dulong et Petit, les métaux qui auraient pu être attachés par le mercure avaient été couverts d'une couche de vernis.