

puisse se propager à l'autre; elle établit, elle maintient une notable différence de température entre les deux parties du courant.

L'explication de cet effet est analogue à celle de l'expérience précédente : à cause de la grande conductibilité du métal la chaleur de la flamme se répand rapidement dans toute la masse sans rester accumulée. Mais comme la masse de cette toile est toujours faible, sa température s'élèverait vite si son refroidissement, qui est très rapide à cause de la grande surface de contact du métal avec l'air, n'amenait une perte considérable de chaleur, perte suffisante pour empêcher l'élévation de température.

Cette propriété a été mise à profit pour l'étude des flammes dont on a pu déterminer ainsi la composition en les coupant dans diverses directions. Mais son application principale est celle qu'en a faite Davy pour la lampe des mineurs. On sait qu'il se produit quelquefois dans certaines mines de houille un dégagement de *grisou* (C^2H^4) qui forme avec l'air un dangereux mélange détonant. Au contact d'une flamme nue, le mélange prend feu, la détonation se produit, amenant toujours de graves accidents. Davy eut l'idée de placer cette flamme dans un cylindre constitué par une toile métallique, sans que l'intérieur ait aucune communication libre avec l'atmosphère. Dans cette condition, le grisou peut bien entrer dans la lampe, y brûler au contact de la flamme, y produire même une petite explosion, mais l'inflammation ne peut traverser la toile ni se communiquer au mélange détonant qui existe dans la galerie de la mine.

On a perfectionné cette lampe pour satisfaire à diverses conditions, notamment pour obtenir plus de clarté, mais dans tous les modèles on trouve toujours une toile métallique agissant comme nous venons de l'indiquer.

CHAPITRE III

CALORIMÉTRIE

213. **Calorimètre à eau.** — Les calorimètres sont des appareils destinés à mesurer des quantités de chaleur, à mesurer le nombre de calories fournies ou absorbées dans des circonstances données. Nous aurons à nous occuper plus spécialement de ceux qui ont été utilisés pour des recherches physiologiques, sans nous astreindre à l'ordre historique. Nous exposerons d'abord le principe de ces appareils.

Le calorimètre le plus fréquemment employé est le calorimètre à eau. Soit une masse d'eau M à la température t dans laquelle nous plongeons

le corps qui fournit une quantité Q de chaleur qu'il s'agit de mesurer: à la fin de l'expérience l'eau est à la température t' . D'après ce que nous avons dit plus haut sur la valeur de la calorie (203), la chaleur gagnée par l'eau étant égale à la chaleur fournie par le corps, on a immédiatement $Q = M(t' - t)$. En réalité l'opération est moins simple : il faut remarquer que le liquide est contenu dans un vase dont la température passe également de t à t' et qu'il absorbe une certaine quantité de chaleur; qu'il en est de même d'un agitateur métallique qui sert à remuer le liquide pour uniformiser la température; qu'il en est de même aussi du thermomètre. On peut tenir compte par le calcul de ces actions, si l'on connaît les poids et les chaleurs spécifiques de ces diverses parties et l'on peut déterminer une masse d'eau M' qui, au point de vue de l'absorption de la chaleur, produirait seule le même effet que le vase, l'agitateur et le thermomètre agissant ensemble : la quantité de chaleur fournie par le corps a donc servi à élever de t à t' la température des masses d'eau M et M' qui absorbent une quantité de chaleur

$$(M + M')(t' - t).$$

Mais de plus, il faut tenir compte de ce que le calorimètre a échangé de la chaleur avec le milieu ambiant et les corps voisins. Si nous désignons par q la perte qu'il a éprouvée et qui correspond à une quantité de chaleur fournie par le corps, on a :

$$Q = (M + M')(t' - t) + q.$$

Si, au contraire, le calorimètre moins chaud que le milieu ambiant en avait reçu une certaine quantité de chaleur q' , la variation de température serait due à la somme des deux quantités de chaleur, et l'on aurait :

$$Q + q' = (M + M')(t' - t).$$

On peut mesurer M , t et t' avec précision; on peut également déterminer M' exactement¹; mais on ne peut trouver q avec la même exactitude et il y a toujours une certaine incertitude sur sa détermination. Aussi cherche-t-on à diminuer sa valeur en réduisant autant que possible l'action de la conduction (en plaçant le vase sur de petits supports en liège, très mauvais conducteur), celle de la convection (en entourant le calorimètre d'un second vase ne touchant pas le premier de manière à

1. Si m_1, m_2, m_3, m_4 sont les poids du vase, de l'agitateur, du verre du thermomètre et du mercure de cet appareil et c_1, c_2, c_3, c_4 les chaleurs spécifiques correspondantes, les quantités de chaleur que chacun de ces corps absorbe pour que sa température s'élève de 1° sont, d'après la définition même de la chaleur spécifique, $m_1 c_1, m_2 c_2, m_3 c_3$ et $m_4 c_4$. La masse d'eau M' qui absorberait autant de chaleur est $M' = m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + m_4 c_4$.

avoir une couche d'air presque immobile) et celle de la radiation (en recouvrant d'une couche d'or poli la surface externe du calorimètre et la surface interne du vase qui entoure celui-ci) (fig. 92).

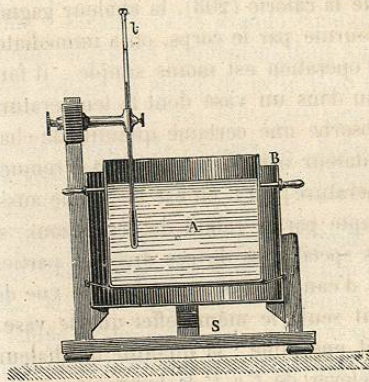


Fig. 92.

216. **Calorimètre à mercure.** — Un autre appareil, le calorimètre de Favre et de Silbermann, est basé sur un principe analogue, sauf que le mercure remplace l'eau et que l'appareil indique directement le nombre de calories fournies sans avoir besoin de noter la température. L'appareil comprend une sphère creuse en fonte B (fig. 93) remplie de mercure et présentant plusieurs orifices; à l'un d'eux, latéral, est adaptée une moufle *l'*, sorte d'éprouvette en fer qui pénètre ainsi dans le réservoir; l'autre *l* porte un tube *tt'*, généralement horizontal, sur

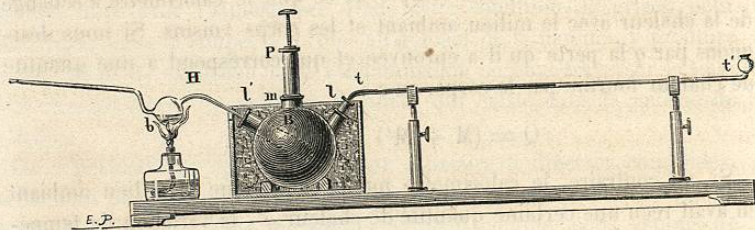


Fig. 93.

lequel sont des graduations qui correspondent à des calories; le troisième *m* est muni d'un piston à vis *p* permettant d'amener la colonne mercurielle au 0 des divisions au début de l'expérience. Le réservoir est entouré de coton ou d'étoupes et renfermé dans une boîte en bois *m*, de manière à restreindre au minimum les échanges de chaleur avec l'atmosphère. Pour faire une mesure, on amène la surface de la colonne mercurielle au zéro, puis on introduit dans la moufle le corps qui fournit la chaleur. Au fur et à mesure que celle-ci se communique au mercure, ce liquide s'échauffe, se dilate et la colonne mercurielle s'avance; quand l'expérience est terminée, le numéro de la division à laquelle s'est arrêté le mercure indique le nombre de calories cédées à l'appareil.

La graduation de l'appareil est obtenue directement par comparaison : le mercure étant au zéro, on verse dans la moufle un poids connu d'eau, 500 grammes par exemple, à une certaine température que l'on observe, on note le point atteint par la colonne mercurielle quand la température

de l'eau s'est abaissée de 20°; à ce moment, l'eau a fourni à l'appareil $0^{\text{ste}},500 \times 20 = 10$ calories. On note le nombre 10 au point trouvé sur la tige, on divise en 10 l'espace compris du zéro à ce point et on prolonge la graduation au delà; chaque division correspond à 1 calorie.

217. **Calorimètre à température constante.** — M. d'Arsonval, dans un but que nous indiquerons plus loin, s'est proposé de construire un calorimètre dans lequel la température est maintenue constante; voici l'ingénieuse disposition qu'il a adoptée.

Le calorimètre est formé par un vase à double paroi, à l'intérieur duquel est placé le corps qui fournit la chaleur; l'espace compris entre les deux parois est rempli d'eau et est traversé par un serpentin qui reçoit de l'eau à 0°, par exemple. Cette eau s'échauffe en parcourant le serpentin et va sortir par l'orifice opposé; mais grâce à une disposition spéciale que nous décrirons plus loin elle ne peut sortir que lorsqu'elle est à la température *t* qui a été choisie à l'avance pour l'expérience, température à laquelle on a à l'avance amené l'eau du calorimètre.

La chaleur fournie par le corps en expérience est tout entière utilisée à chauffer l'eau qui passe dans le serpentin; cette eau est recueillie, soit *P* son poids; puisqu'elle est entrée à 0 et sortie à *t*° elle a absorbé une quantité de chaleur qui est *Pt*. On a donc $Q = Pt$.

Dans ces conditions, il y aurait une cause d'erreur qu'on ne pourrait négliger : l'appareil fournit en effet de la chaleur au milieu ambiant et aux corps voisins et, comme dans les cas précédents, il y aurait une correction à faire. Pour l'éviter, M. d'Arsonval place l'appareil tout entier dans un autre vase disposé absolument de la même façon, mais plus grand. On dispose les conditions de l'expérience pour que, dans ce vase extérieur, la température soit maintenue à la même valeur *t* que dans le vase intérieur. Celui-ci étant ainsi en équilibre de température avec l'enceinte qui l'entoure ne subit ni gain, ni perte de chaleur et, les corrections étant évitées, on a bien $Q = Pt$.

Cet appareil pourrait également être utilisé à mesurer la chaleur absorbée par le corps placé à l'intérieur : dans ce cas, l'effet serait de refroidir l'eau du calorimètre, et pour maintenir la température constante de *t*°, il faudrait faire passer de l'eau chaude dans le serpentin. Soit *T* la température de cette eau qui, comme précédemment, sort à *t*°; si *P'* est le poids d'eau qui a traversé le serpentin pendant l'expérience, la quantité de chaleur qu'elle a abandonnée et qui est égale à celle absorbée par le corps *Q*, est : $Q = P'(T - t)$.

Outre que cet appareil répond à une condition importante, celle de maintenir la température constante, il est intéressant de remarquer que, pour une même quantité de chaleur, en prenant *T* très voisin de *t* on aura pour *P* une grande valeur; comme on sait que la balance est un appareil

qui donne des mesures très précises, il en résulte que l'on peut avoir Q avec une grande approximation.

218. **Calorimètre à température stationnaire.** — On a également employé pour mesurer les quantités de chaleur une méthode qui repose sur la détermination des *températures stationnaires*. Nous avons dit que lorsqu'un corps dans lequel il y a une production continue de chaleur est placé dans un milieu à température invariable, la température du corps s'élève jusqu'à une certaine valeur (212) qui reste constante, la perte de chaleur par refroidissement étant justement égale à la quantité de chaleur fournie. De plus, les pertes de chaleur sont sensiblement proportionnelles aux excès de la température du corps sur celle de l'enceinte. Si donc, dans des conditions différentes, un même corps présente sur le milieu ambiant des excès de température θ et θ' , on peut écrire, en désignant par q et q' les quantités de chaleur fournies dans le même temps pour ces deux conditions :

$$\frac{q}{q'} = \frac{\theta}{\theta'}.$$

Si donc par une expérience directe on a déterminé q' et θ' , cette équation donne q si l'on connaît θ .

Indépendamment des recherches physiques dans lesquelles cette méthode a été employée, elle a servi à la détermination des quantités de chaleur produites par l'homme et les animaux. Hirn, dans les mémorables recherches qu'il a faites sur cette question, plaçait l'homme en expérience dans une guérite en bois et déterminait à l'aide d'un thermomètre l'excès θ de température de la guérite sur l'air extérieur. D'autre part, la guérite étant vide, il y faisait brûler un bec de gaz jusqu'à ce que la température devint constante et notait l'excès de température θ' sur l'air ambiant; d'après la quantité de gaz brûlé dans l'unité de temps il pouvait calculer la quantité q' de chaleur fournie à l'appareil; connaissant ainsi θ' , q' et θ , il pouvait déduire q de la relation précédente.

219. — D'Arsonval a proposé l'emploi d'une méthode analogue, mais avec un dispositif perfectionné. La guérite est remplacée par une cloche à double paroi située dans une chambre à température à peu près invariable; l'air qui est compris entre ces deux parois, arrive ainsi que tout l'appareil à une température stationnaire; au lieu de déterminer celle-ci à l'aide d'un thermomètre, on la mesure par la dilatation même de l'air sous l'influence de l'élévation de température. A cet effet, l'air compris entre les parois est relié par un tube à manomètre différentiel dont l'autre branche communique à un réservoir à air à température et à pression constantes. La dénivellation dans le manomètre peut être mesurée et l'on en déduit l'excès de température θ de l'air de la cloche sur l'air ambiant. D'autre part on détermine des valeurs correspondantes θ' et q'

par la combustion d'un bec de gaz comme dans les expériences de Hirn, et l'on déduit de la même façon la quantité q de chaleur fournie à l'appareil par l'homme en expérience.

Enfin M. Ch. Richet a employé pour des recherches du même genre faites sur de petits animaux un appareil basé sur le même principe. Le calorimètre (fig. 94) est formé de deux hémisphères constitués chacun par

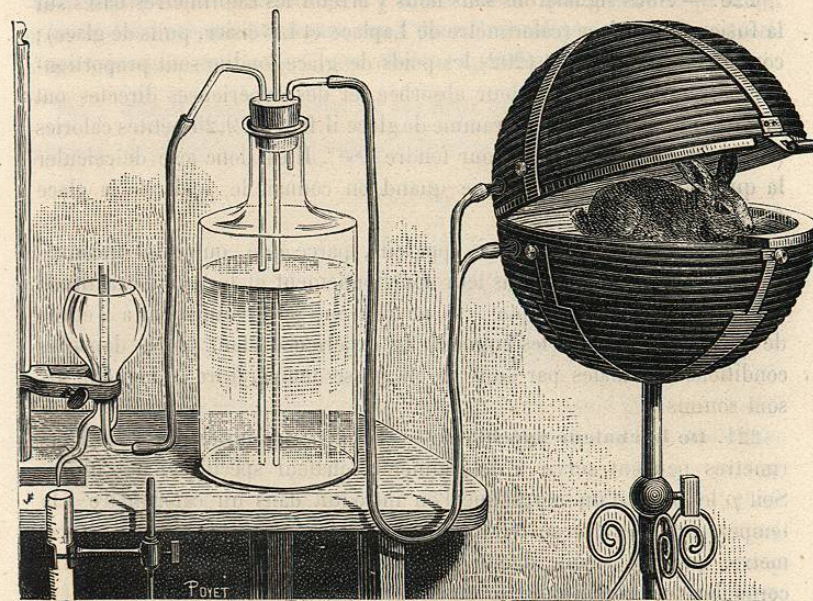


Fig. 94.

un tube de cuivre mince enroulé suivant une courbe hélicoïdale; ces deux parties sont reliées par une charnière et constituent une sorte de boîte qu'on ouvre pour y placer l'animal et qu'on referme ensuite. Comme dans l'appareil précédent, l'air du serpentin s'échauffe et l'on détermine sa température par sa dilatation même : à cet effet les deux serpentins sont reliés à un vase clos contenant de l'eau dans laquelle plonge un siphon dont la longue branche reste pleine d'eau, par une disposition particulière. Par suite du dégagement de chaleur produit par l'animal, l'air du serpentin se dilate, presse sur l'eau du vase et en fait écouler une partie par le siphon : du poids de l'eau écoulee, on pourrait déduire la température; mais il est plus commode d'en déduire directement la quantité de chaleur fournie. A cet effet on effectue une mesure directe, en plaçant dans le calorimètre un vase rempli d'eau chaude dont on note les variations de température; celles-ci permettent de calculer la quantité de chaleur q' fournie à l'appareil dans un temps donné; on mesure d'autre

part le poids d'eau écoulé p' . En admettant la proportionnalité, ce qui est sensiblement vrai, on en déduit que pour l'unité de poids d'eau écoulée par le siphon l'appareil a reçu $\frac{q'}{p'}$ calories. C'est ce nombre qui sert dans les recherches pour calculer la quantité de chaleur fournie quand on connaît le poids de l'eau écoulée.

220. — Nous signalerons sans nous y arrêter les calorimètres basés sur la fusion de la glace (calorimètre de Laplace et Lavoisier, puits de glace); comme nous l'avons dit (202) les poids de glace fondue sont proportionnels aux quantités de chaleur absorbée, et des expériences directes ont montré que pour fondre 1 gramme de glace il fallait 79,25 petites calories (ou 79,25 grandes calories pour fondre 1^{kg}r). Il est donc aisé de calculer la quantité de chaleur fournie quand on connaît le poids de la glace fondue.

Nous n'insistons pas sur ces appareils, parce que, outre les inconvénients qu'ils présentent dans leur fonctionnement et le peu d'exactitude sur laquelle on peut compter, ils ne peuvent servir utilement à l'étude de la chaleur animale, les animaux en expérience étant placés dans des conditions anormales par suite de la basse température à laquelle ils sont soumis.

221. **De la chaleur spécifique.** — Disons, sans insister, que les calorimètres peuvent servir à déterminer la chaleur spécifique des corps. Soit p le poids d'un corps que l'on introduit dans un calorimètre à la température t , et qui se refroidit jusqu'à la température t' . Le calorimètre, quel qu'il soit, donne la quantité de chaleur q fournie par le corps dans ces conditions : or on sait (204) que l'on a :

$$q = pc(t - t').$$

Dans cette équation tout est connu à l'exception de c , que l'on pourra par suite en déduire.

Comme nous l'avons dit, la connaissance de la chaleur spécifique est sans intérêt au point de vue des applications physiologiques ou médicales : il n'y a donc pas lieu de nous y arrêter en général.

La question de la chaleur spécifique des gaz peut, au point de vue théorique, fournir des notions que nous devons au moins signaler.

Disons d'abord que les calorimètres décrits précédemment sont d'un emploi peu commode pour la détermination de cette donnée, à cause de la faible masse d'un volume même considérable de gaz. Aussi a-t-il fallu des méthodes spéciales (Delaroche et Bérard, Regnault) pour faire cette détermination avec précision.

Comme nous le dirons plus loin, il est très difficile sinon impossible, d'élever un peu notablement la température d'un corps solide ou liquide en s'opposant à sa dilatation : aussi les chaleurs spécifiques déterminées

pour ces corps ont-elles été obtenues en laissant ceux-ci se dilater librement.

La question n'est pas la même pour les gaz dont on peut élever la température en empêchant toute augmentation de volume. *A priori*, on ne peut dire si la chaleur spécifique d'un gaz doit être la même, soit qu'on le laisse se dilater, soit qu'on maintienne son volume constant; nous expliquerons plus loin qu'il y a des raisons qui montrent qu'il doit y avoir deux valeurs différentes : on a donc à considérer une chaleur spécifique à pression constante C , une chaleur spécifique à volume constant c .

On a trouvé pour le rapport de ces deux quantités $\frac{C}{c} = 1,41$: nous verrons plus tard les conséquences à déduire de cette valeur.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES DILATATIONS

Nous avons maintenant les éléments qui nous permettront d'étudier les effets divers produits par la chaleur sur les corps : nous étudierons successivement :

- Les effets géométriques, changements de dimensions;
- Les effets mécaniques statiques;
- Les effets mécaniques dynamiques;
- Les effets physiques se rapportant aux propriétés générales des corps, aux changements d'état.

Il restera à considérer les effets lumineux et les effets électriques, que nous examinerons respectivement dans les chapitres consacrés à l'optique et à l'électricité.

222. **Dilatation des corps par la chaleur. Solides.** — Nous avons dit d'une manière générale que les variations d'état calorifique, les variations de température, ont pour effet de changer les dimensions des corps; occupons-nous de ces changements dans le cas des solides, d'abord; nous supposons, jusqu'à nouvel ordre, qu'il s'agit de corps physiquement homogènes, de corps isomorphes.

Nous ne nous arrêterons pas sur les expériences classiques qui montrent qu'une barre solide libre augmente de longueur lorsqu'on la chauffe et diminue lorsqu'on la refroidit (Pyromètre à cadran); et qu'un corps solide augmente de volume (Anneau de S'Gravesande). Il est cependant, à propos de ce dernier cas, une remarque que nous croyons utile de faire; c'est qu'un corps creux augmente de capacité lorsqu'on le chauffe et que sa dilatation est la même que celle de la partie pleine qui le rem-