626. **Thermomètres électriques. — Thermomultiplicateur.** — La chaleur donne naissance à certains phénomènes électriques à l'aide desquels on peut aussi déterminer les températures. L'appareil thermométrique le plus important qui soit fondé sur ce principe, est le *thermomultiplicateur*.

Description. — Cet appareil consiste dans la réunion de deux instruments, que nous étudierons plus loin en détail, le *galvanomètre* et la *pile thermo-électrique* (fig. 679). Des pôles *m* et *n* de la

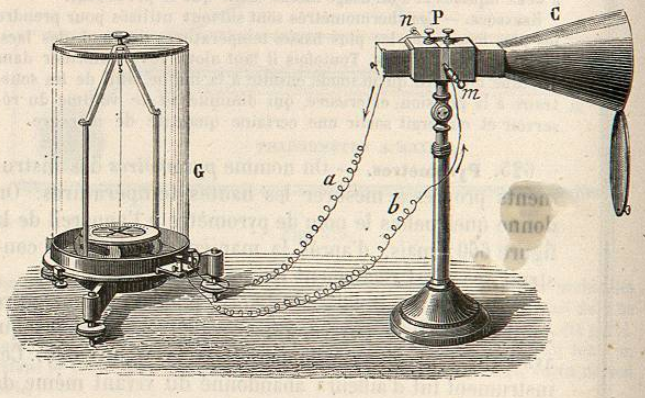

Fig. 679.

pile partent deux fils de cuivre, qui se rendent à deux bornes fixées en dehors de la cage du galvanomètre, lesquelles sont en contact chacune avec un des bouts du circuit galvanométrique. Par suite, dès qu'un courant thermo-électrique prend naissance dans la pile, il se rend au galvanomètre par un des fils *a* ou *b*, et revient par l'autre. Avant de faire passer le courant dans le circuit galvanométrique, on a soin d'orienter l'appareil de manière que les fils du cadre soient parallèles à la direction de l'aiguille. C'est ensuite de la déviation du pôle austral à droite ou à gauche que l'on conclut s'il y a un courant, quelle est sa direction, et, par suite, s'il y a eu échauffement ou refroidissement sur la face exposée à la source de chaleur.

Graduation et usages. — Quant à la quantité de chaleur reçue ou perdue par la pile, on la déduit de la grandeur et du sens de la déviation. En effet, l'expérience a appris que, jusqu'à 20 degrés du galvanomètre, les déviations de l'aiguille sont proportionnelles à la quantité de chaleur qui tombe sur la pile. Pour les déviations plus grandes, les quantités de chaleur sont données par des tables construites à cet effet.

Afin d'arrêter les rayons calorifiques autres que ceux qu'on veut étudier, on place sur la face de la pile qui est exposée à la source de chaleur ou de froid, un cône de cuivre C noirci à l'intérieur. Un écran circulaire, qu'on abaisse ou qu'on élève à volonté, sert à laisser passer ou à intercepter la chaleur.

Appareil de Melloni. — Pour faciliter l'étude du rayonnement et du pouvoir diathermane des corps, Melloni, physicien italien (mort en 1849), a ajouté à l'instrument que nous venons de décrire plusieurs pièces accessoires, dont nous donnerons la description dans un des chapitres suivants. C'est sous cette forme que l'appareil prend le nom de *thermomultiplicateur de Melloni*.

Remarque. — Enfin, remarquons que le thermomultiplicateur est un véritable *thermomètre différentiel* (620); car il ne donne point la température absolue des soudures qui reçoivent les rayons calorifiques, mais la différence entre leur température et celle des soudures opposées.

CHAPITRE II

DILATATION DES SOLIDES.

627. **Définitions préliminaires. — Coefficients de dilatation.** — On a déjà vu (606) qu'on distingue dans les corps solides, deux sortes de dilatations : la *dilatation linéaire* (c'est-à-dire suivant une seule dimension) et la *dilatation cubique* (c'est-à-dire en volume).

On nomme *coefficient de dilatation linéaire* l'allongement que prend l'unité de longueur d'un corps lorsque sa température s'élève de 0° à 1°, et *coefficient de dilatation cubique* l'accroissement que prend, dans le même cas, l'unité de volume.

Ces coefficients varient d'un corps à l'autre; pour un même corps, il existe entre eux une relation simple : *le coefficient de dilatation cubique est triple du coefficient de dilatation linéaire.* On peut donc, en multipliant ou en divisant par 3, trouver l'un de ces coefficients lorsque l'autre est connu.

Relation entre le coefficient linéaire et le coefficient cubique : démonstration. — Soit un cube dont le côté a une longueur 1 à 0° (fig. 680). Si l'on représente par *k* l'allongement que prend ce

côté en passant de 0° à 1°, sa longueur à 1° sera $1 + k$, et le volume du cube, qui était 1 à 0°, sera actuellement $(1 + k)^3$, c'est-à-dire $1 + 3k + 3k^2 + k^3$. Or, l'allongement k étant toujours une fraction très petite (630), son carré k^2 et son cube k^3 sont des fractions assez petites pour ne pas influer sur la dernière décimale des nombres qui représentent les coefficients de dilatation cubique. On peut donc négliger les termes en k^2 et en k^3, et le volume à 1° devient très approximativement $1 + 3k$. L'accroissement de l'unité de volume est donc $3k$, c'est-à-dire triple du coefficient de dilatation linéaire.

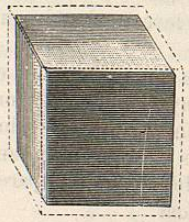

Fig. 680.

Remarques. — 1° Ce procédé de simplification, c'est-à-dire la suppression des puissances de k supérieures à la première, est *de règle* dans tous les calculs relatifs aux dilatations. Il est parfaitement justifié par l'extrême petitesse de ces nombres, d'où il résulte que les erreurs commises échappent à l'observation.

2° *Exception à la relation précédente.* — Cette démonstration, et par suite la relation, s'appliquent seulement aux corps qui se dilatent en restant *semblables à eux-mêmes*. Cela n'a lieu que pour les corps *amorphes* et pour les corps *cristallisés dans le système cubique :* tous les autres sont plus ou moins déformés par la dilatation, et il n'existe pas de relation aussi simple entre leurs coefficients linéaire et cubique.

628. **Mesure des coefficients de dilatation linéaire. — Expériences de Lavoisier et Laplace.** — De nombreux expérimentateurs se sont occupés de mesurer les coefficients de dilatation linéaire, et ont imaginé divers appareils à cet usage. Nous décrirons d'abord la méthode employée par Lavoisier et Laplace, en 1782.

Description de l'appareil[1]. — Il se compose d'une cuve de cuivre solidement établie sur un fourneau entre quatre piliers de pierre. Dans la cuve est la substance dont on cherche le coefficient de dilatation, réduite en barre de deux mètres de long. D'un bout, la barre appuie contre une lame de verre r, maintenue entre les deux piliers qui occupent la gauche du dessin; de l'autre, elle peut s'allonger librement, en contact avec une deuxième lame de verre v, fixée à un axe horizontal d'acier, qui tourne dans

1. Il est représenté en perspective dans la figure 681, et en coupe dans la figure 682.

deux coussinets sur les piliers à droite. A son extrémité antérieure, cet axe est terminé par une pièce en équerre sur laquelle est maintenue une lunette L, qui suit tous les mouvements de l'axe et de la lame v. En O sont deux barres de fer qui supportent, à leur partie inférieure, un rouleau de verre sur lequel repose d'un bout la barre qui est dans la cuve; à l'autre bout, en t,

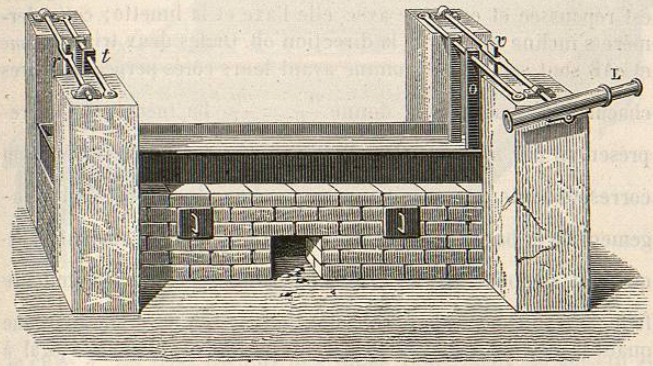

Fig. 681.

est un mode de suspension pareil, en sorte que la barre ne rencontre qu'une résistance extrêmement faible à son allongement. Enfin, dans la lunette est un fil micrométrique horizontal qui, lorsqu'elle tourne d'un certain angle, parcourt un nombre de di-

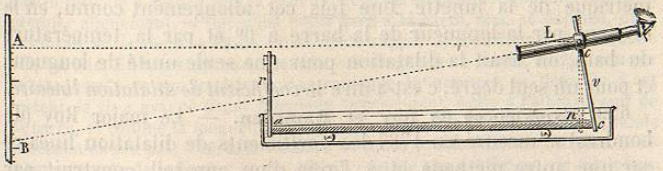

Fig. 682.

visions correspondant sur une échelle verticale AB placée à 200 mètres de distance.

Méthode. — On mettait d'abord de la glace dans la cuve, et, la barre étant à zéro, les deux lames v et r en contact avec elle, et la lunette dans une direction horizontale, on observait à quelle division correspondait le fil de la lunette sur l'échelle AB; puis on

retirait la glace, on remplissait la cuve d'eau ou d'huile, et on chauffait. La barre se dilatait et lorsque la température était devenue stationnaire, d'un côté on notait la température du bain à l'aide de thermomètres qui y étaient plongés, et de l'autre la division de l'échelle visée dans la lunette.

De ces données on déduisait ensuite l'allongement de la barre. En effet, celle-ci s'étant allongée d'une quantité nc, la tige v est repoussée et entraîne avec elle l'axe et la lunette; cette dernière s'incline alors dans la direction oB. Or les deux triangles onc et oAB sont semblables comme ayant leurs côtés perpendiculaires chacun à chacun, ce qui donne $\frac{nc}{AB} = \frac{on}{oA}$. De même, si l'on représentait par nc' un autre allongement, et par AB′ la déviation correspondante, on aurait $\frac{nc'}{AB'} = \frac{on}{oA}$. Donc le rapport de l'allongement de la barre à la déviation de la lunette est constant, puisqu'il est toujours égal à $\frac{on}{oA}$. Or, par une expérience préliminaire faite avec une seconde barre plus longue que la première d'une quantité connue, on avait constaté que ce rapport était égal à $\frac{1}{744}$. On avait donc

$$\frac{nc}{AB} = \frac{1}{744}, \quad \text{d'où} \quad nc = \frac{AB}{744};$$

c'est-à-dire que l'allongement total de la barre s'obtenait en divisant par 744 la distance parcourue sur l'échelle par le fil micrométrique de la lunette. Une fois cet allongement connu, en le divisant par la longueur de la barre à 0° et par la température du bain, on avait la dilatation pour une seule unité de longueur et pour un seul degré, c'est-à-dire le *coefficient de dilatation linéaire*.

629. **Expériences de Roy et Ramsden.** — Le major Roy (de Londres) a mesuré en 1787 les coefficients de dilatation linéaire par une autre méthode et à l'aide d'un appareil, construit par Ramsden.

Description de l'appareil. — Il consiste en trois cuves parallèles, de deux mètres de long (fig. 683). Dans celle du milieu est, en forme de barre prismatique, le corps dont on cherche le coefficient de dilatation; dans les deux autres sont des barres de fonte exactement de même longueur que la première. Aux deux extrémités de chacune de ces barres sont adaptées des tiges verticales. Dans les cuves C et B, ces tiges portent de petits disques

percés de trous circulaires sur lesquels sont tendus en croix des fils micrométriques, comme des réticules de lunette; mais, dans

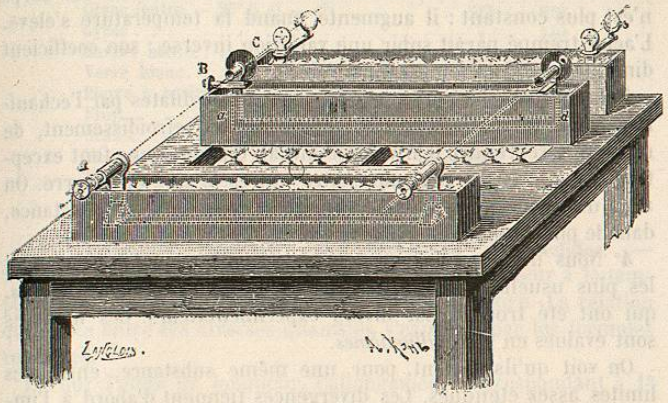

Fig 683.

la cuve A, les tiges portent des tubes renfermant un objectif et un oculaire de microscope, munis aussi de réticules.

Méthode. — Les cuves étant remplies de glace, et les trois barres étant à la température zéro, les points de croisement des fils sur les disques et dans les tubes sont exactement en ligne droite à chaque extrémité. On retire alors la glace de la cuve centrale seule, et l'on y verse de l'eau, qu'on porte à 100° au moyen de lampes à alcool placées au-dessous de la cuve. La barre qui y est contenue se dilate; mais comme elle bute contre une pièce fixe en d, tout l'allongement se fait dans le sens da. Le réticule d reste donc en ligne, tandis que le réticule a avance vers la gauche. Pour qu'on puisse le ramener dans son premier alignement, sa tige n'est point fixée à la barre, mais se déplace, dans le sens de la longueur, à l'aide d'une vis de rappel micrométrique B à laquelle elle est liée. En tournant lentement la vis de gauche à droite, on fait avancer la tige jusqu'à ce que le réticule a se retrouve de nouveau en ligne. Or, à cet instant, la vis a avancé d'une longueur précisément égale à l'allongement de la barre, et comme la longueur dont la vis a avancé se déduit avec une grande précision de son pas, d'après le nombre de tours qu'elle a faits, on a ainsi la dilatation totale de la barre : on en déduit ensuite son coefficient de dilatation, en divisant par la température du bain et par la longueur de la barre à zéro.

Remarque. — Ce coefficient est le *coefficient moyen* de dilatation entre les deux températures extrêmes auxquelles la barre a été portée.

630. **Résultats généraux relatifs à la dilatation des solides.** — Les principaux résultats des diverses expériences faites sur la dilatation des corps solides non cristallisés sont les suivants.

1° La dilatation du verre et des métaux est uniforme entre 0° et 100°, c'est-à-dire que le coefficient de dilatation de ces sub-

stances est sensiblement constant entre ces limites, et que leur dilatation est proportionnelle à l'élévation de température.

2° Au delà de 100°, le coefficient de dilatation de ces corps n'est plus constant : il augmente quand la température s'élève. L'acier trempé paraît subir une variation inverse : son coefficient diminue quand la température s'élève.

3° La plupart des corps solides, après s'être dilatés par l'échauffement de 0° à 100°, se contractent par le refroidissement, de manière à reprendre leur volume initial. Quelques-uns font exception à cette règle générale, entre autres le zinc et le verre. On a vu une conséquence de ce fait, pour cette dernière substance, dans le phénomène du déplacement du zéro (thermométrie).

4° Nous donnons dans le tableau suivant, pour les substances les plus usuelles, les coefficients de *dilatation linéaire moyens*, qui ont été trouvés par divers expérimentateurs. Ces nombres sont évalués en *dix-millionièmes*.

On voit qu'ils varient, pour une même substance, entre des limites assez étendues. Ces divergences tiennent d'abord à l'imperfection des méthodes de mesure, et puis à la variabilité de structure des échantillons des divers corps qui ont été soumis aux expériences.

Remarque. — Les coefficients de dilatation cubique se déduisent immédiatement des nombres ci-dessous en les multipliant par 3. Cependant il existe une méthode (*thermomètre à poids*), employée par Dulong et Petit, pour déterminer *directement* les coefficients de dilatation cubique (639).

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE DES SOLIDES ENTRE 0° ET 100°.

1° *Métaux et alliages.*

Zinc	de	294	à 341
Cadmium		»	315
Plomb		278	288
Étain		194	228
Aluminium		»	222
Cuivre jaune		178	214
Argent		191	208
Bronze		182	191
Cuivre rouge		170	172
Or		147	155
Fer		116	144
Bismuth		»	139
Acier recuit		124	137
Acier trempé		122	137
Acier		117	119
Fonte de fer		098	112
Platine		086	088

2° *Solides divers.*

Glace (entre — 27°,5 et — 1°)	513	528
Gypse	»	140
Marbre blanc	085	107
Verre blanc	077	092
Pierre à bâtir	043	090
Flint	082	087
Granit	079	090
Marbre	042	057
Briques	049	055
Bois de sapin	035	050

631. **Formules relatives aux dilatations des solides.** — 1° Soient l_0 la longueur d'une barre à 0°, l_t sa longueur à la température t, et k son coefficient de dilatation linéaire. La relation qui existe entre ces diverses quantités s'exprime par les formules suivantes.

I. Pour l'unité de longueur, l'allongement correspondant à 1° étant k, celui qui correspond à t degrés est t fois k ou kt; donc il est l_0 fois kt ou ktl_0 pour l_0 unités. La longueur de la barre, qui était l_0 à 0°, est donc devenue $(l_0 + ktl_0)$ à t degrés, d'où

$$l_t = l_0 + ktl_0.$$

En mettant l_0 en facteur commun dans le second membre, on tire de cette équation la formule usuelle

$$[1] \qquad l_t = l_0 (1 + kt).$$

La formule [2] sert à trouver la longueur l_t à t degrés, lorsqu'on connaît la longueur l_0 à 0°.

II. En divisant les deux membres par $(1 + kt)$, on en déduit

$$[2] \qquad l_0 = \frac{l_t}{1 + kt}.$$

Cette dernière formule sert à trouver la longueur à 0°, lorsqu'on connaît la longueur à t degrés.

III. Enfin, si dans l'égalité [1] on transpose l_0 dans le premier membre, et qu'on divise des deux côtés par tl_0, on a

$$[3] \qquad k = \frac{l_t - l_0}{l_0 t},$$

équation qui sert à calculer le coefficient de dilatation k quand l_t, l_0 et t sont connus.

IV. Si, au lieu de considérer les dilatations linéaires, on considère les dilatations cubiques, on trouve des formules analogues à celles qui précèdent. Soient V_0 le volume d'un corps à 0°, V_t son volume à t degrés, et K son coefficient de dilatation cubique (lequel, comme on sait, est triple de k); on trouve, par le même raisonnement que ci-dessus,

$$[4] \qquad V_t = V_0 (1 + Kt)$$

et

$$[5] \qquad V_0 = \frac{V_t}{1 + Kt},$$

formules qui servent à passer du volume à 0° au volume à t degrés, et réciproquement.

En remplaçant K par $3k$, on peut aussi les écrire sous la forme

$$[6] \qquad V_t = V_0 (1 + 3kt)$$

et

$$[7] \qquad V_0 = \frac{V_t}{1 + 3kt}.$$

Les binômes $1 + kt$ et $1 + Kt$ se désignent sous les noms, l'un de *binôme de dilatation linéaire*, l'autre de *binôme de dilatation cubique*. Les formules [2] et [5] font voir que *les longueurs et les volumes à t degrés sont directement proportionnels au binôme de dilatation*. Les formules [4] et [5] s'appliquent également aux liquides et aux gaz.

V. *Soit l_t la longueur d'une barre métallique à t degrés; quelle sera sa longueur $l_{t'}$ à t' degrés, son coefficient de dilatation étant k?*

Ce problème se résout en cherchant la longueur de la barre à 0°, laquelle est $\frac{l_t}{1 + kt}$, d'après la formule [2]; puis de la longueur à 0° on passe à la longueur à t' au moyen de la formule [1], ce qui donne enfin $l_{t'} = \frac{l_t (1 + kt')}{1 + kt}$. En effectuant la division algébrique indiquée, et en appliquant la règle de simplification habituelle, la formule devient

$$[8] \qquad l_{t'} = l_t \left[1 + k (t' - t)\right].$$

VI. *Relation entre le poids spécifique à 0° et les poids spécifiques à diverses températures.* — Lorsqu'on chauffe une masse déterminée d'un corps, son volume et, par suite, son poids spécifique

varient, mais sa masse et son poids restent constants. Soit donc P le poids d'un corps, V_0 et D_0 son volume et son poids spécifique à t^0, et K le coefficient de dilatation cubique. On a évidemment, pour deux températures différentes,

$$P = V_0 D_0 = V_t D_t,$$

d'où

$$\frac{D_0}{D_t} = \frac{V_t}{V_0}.$$

Cette équation montre que les poids spécifiques varient avec la température en raison inverse des volumes. De là on déduit les relations suivantes, relatives aux poids spécifiques :

$$[9] \qquad D_t = \frac{D_0}{1 + Kt},$$

$$\frac{D_{t'}}{D_t} = \frac{1 + kt}{1 + Kt'},$$

ou bien

$$[10] \qquad D_{t'} = D_t \left[1 - K (t' - t)\right].$$

632. **Dilatation des cristaux.** — Tout ce que nous avons dit précédemment ne se rapporte qu'à la dilatation des corps solides homogènes et amorphes. Ce sont les seuls, en effet, qui se dilatent en restant semblables à eux-mêmes. Les corps cristallisés, au contraire, ne gardent pas en s'échauffant une forme géométriquement semblable à celle qu'ils possédaient à une température plus basse.

1° *Expérience de Mitscherlich.* — Cette anomalie a été découverte, dès 1823, par Mitscherlich. Ayant mesuré les inclinaisons mutuelles des faces d'un rhomboèdre de spath à des températures différentes, il reconnut qu'elles variaient d'une manière sensible. De 0° à 100° cette variation angulaire s'élevait à 8′ 30″ et les angles dièdres *diminuaient* quand la température s'élevait. Il en résultait que la dilatation était plus *grande* dans la direction du petit axe du rhomboèdre que dans celle des autres diagonales, et que, par suite, la forme du cristal se rapprochait de la forme cubique.

2° *Expérience du gypse en fer de lance.* — On peut constater par une expérience très simple la dilatation irrégulière de certains cristaux. On taille dans un *gypse en fer de lance*, perpendiculairement à la ligne médiane qui divise le cristal, une lame terminée par deux faces planes, parallèles et polies. On obtient ainsi un double miroir plan (Oa, Ob) dont les deux parties se raccordent suivant un même plan horizontal, dans les conditions de température où l'on a opéré (fig. 684, I). En plaçant un objet délié, un fil par exemple, devant ce miroir, perpendiculairement à la ligne médiane, on n'en voit qu'une seule et même image rectiligne. Mais si l'on chauffe le gypse jusqu'à 80° environ, on produit une déformation sensible de la lame, accusée par l'obliquité des deux miroirs Oa' et Ob' (fig. 684, II) et mise en évidence par les deux images, en forme de ligne brisée, qu'ils donnent du même objet.

3° *Expériences de M. Fizeau.* — L'étude de la dilatation irrégulière des cristaux a été faite par M. Fizeau, au moyen d'une méthode très délicate, em-

pruntée aux lois de l'optique physique. Elle consistait essentiellement à produire des anneaux de Newton par la superposition d'un plan de verre et d'une lame mince du cristal à étudier, puis à observer le déplacement des anneaux qui avait lieu lorsqu'on élevait la température du cristal. Il déduisait de ce

(I) (II)

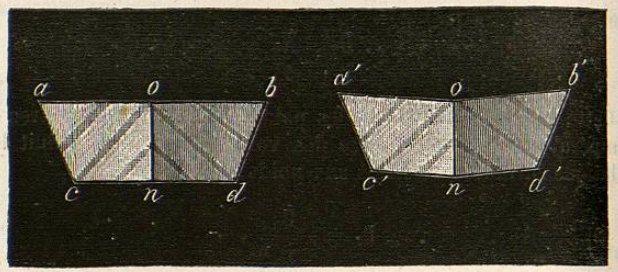

Fig. 684.

déplacement, avec une grande précision, les dilatations éprouvées par la lame dans un sens perpendiculaire à ses faces.

4° *Résultats généraux.* — Les principaux résultats relatifs à la dilatation irrégulière des cristaux dans les divers systèmes cristallins sont les suivants.

I. *Système cubique* [caractérisé par trois axes rectangulaires égaux entre eux; — type géométrique : cube, octaèdre régulier; — exemples : *sel gemme, spath fluor, alun, chlorate de soude*]. *La dilatation est la même dans toutes les directions.*

Il n'y a donc qu'un seul coefficient de dilatation, λ, qui est égal à $\frac{K}{3}$, c'est-à-dire au tiers du coefficient cubique. Les cristaux de ce système se dilatent donc de la même manière que les corps amorphes.

II. *Système quadratique* [caractérisé par *trois axes rectangulaires,* dont deux seulement sont égaux; — type géométrique : *prisme droit à base carrée;* — exemples : *zircon* (ou *silicate de zirconium*), *cyanoferrure de potassium.*

III. *Système rhomboédrique* [caractérisé par quatre axes, dont trois égaux, également inclinés et situés dans un même plan, perpendiculaires au quatrième axe, qui est inégal (axe principal); — type géométrique : *rhomboèdre, prisme hexagonal;* — exemples : *spath d'Islande, quartz*].

Les systèmes II *et* III *présentent la même anomalie dans leur dilatation : ils ont deux coefficients de dilatation linéaire, l'un* λ', *suivant l'axe principal, et l'autre* λ, *suivant toute autre direction perpendiculaire à l'axe.*

Il en résulte que le coefficient cubique K est donné par l'équation

$$K = \lambda + 2\lambda'.$$

IV. *Système orthorhombique* [caractérisé par trois axes rectangulaires et inégaux; — type géométrique : *prisme droit à base rhombe;* — exemples : *nitre, sulfate de magnésie; topaze*].

V. *Système clino-rhombique* [caractérisé par trois axes obliques dont deux égaux; — type géométrique : *prisme oblique à base rhombe;* exemples : *sulfate de chaux*].

VI. *Système dissymétrique* ou *oblique* [caractérisé par trois axes obliques et inégaux; — type géométrique : *prisme oblique à base parallélogramme;* — exemple : *feldspath*].

Ces trois derniers systèmes présentent la même anomalie. Ils ont trois coefficients linéaires différents, λ, λ', λ'', *suivant trois directions rectangulaires.*

Ces directions sont celles mêmes des axes dans le quatrième système; mais elles sont quelconques, et sans relations simples avec celles des axes, dans les deux derniers systèmes.

5° *Anomalie de l'iodure d'argent. — Dilatations négatives.* — M. Fizeau a découvert que l'*iodure d'argent* possède la propriété de *se contracter* lorsque la température *s'élève*, et de *se dilater* lorsque la température *s'abaisse.* Le phénomène reste parfaitement régulier et continu dans les limites de température de — 10° à + 70°. La dilatation de l'iodure d'argent doit donc être exprimée, entre ces limites, par un *coefficient négatif.* M. Fizeau a opéré successivement sur l'iodure d'argent fondu et sur l'iodure en poudre comprimée; dans ces deux cas, la contraction avait lieu dans toutes les directions, et le coefficient négatif a été trouvé égal à (— 0,000000139) pour le premier et à (— 0,000000137) pour le second. L'iodure d'argent cristallisé *se contracte* dans la direction de l'axe principal, mais *se dilate* dans la direction normale à l'axe principal; mais comme le coefficient négatif est (— 0,00000597), tandis que le coefficient positif est (+ 0,00000065), il en résulte qu'il y a, en définitive, une contraction de volume.

Les rhomboèdres de spath *se dilatent*, au contraire, dans la direction de l'axe cristallographique principal, tandis qu'ils *se contractent* dans les directions perpendiculaires. Le *béryl* présente une anomalie analogue à celle de l'iodure d'argent cristallisé : sa dilatation est *négative* suivant l'axe principal et *positive* (quoique très faible) suivant la direction perpendiculaire à l'axe.

633. **Applications de la dilatation des solides.** — La dilatation des solides donne lieu à de nombreuses applications. Les grilles des fourneaux, par exemple, doivent ne pas être encastrées trop juste à leurs extrémités, mais rester libres au moins d'un côté; sinon elles descellent les pierres du foyer en se dilatant. Si les rails des chemins de fer se touchaient, la force de dilatation les courberait de distance en distance, ou briserait leurs coussinets.

Une force énorme est développée par la dilatation ou la contraction des barres métalliques. Ainsi, pour vaincre la dilatation ou la contraction que subit une barre de fer (de 1 mètre de longueur et 1^{cq} de section), quand sa température varie entre 0° et 100° (environ 1^{mm},17), il faudrait exercer, dans un sens ou dans l'autre, un effort équivalent à la pression de 2450 kilogrammes (par centimètre carré). On a utilisé cette traction pour rapprocher les murs latéraux d'une galerie du Conservatoire des Arts et Métiers, que la poussée de la voûte avait écartés de la verticale (fig. 685).

Les charrons utilisent de même la force de contraction du fer qui se refroidit pour garnir de jantes les roues des voitures.

Lorsqu'on chauffe ou refroidit trop brusquement un vase de

verre, il éclate; cela est dû à ce que, le verre étant mauvais conducteur de la chaleur, les parois s'échauffent inégalement, et par suite se dilatent de même, ce qui amène la rupture.

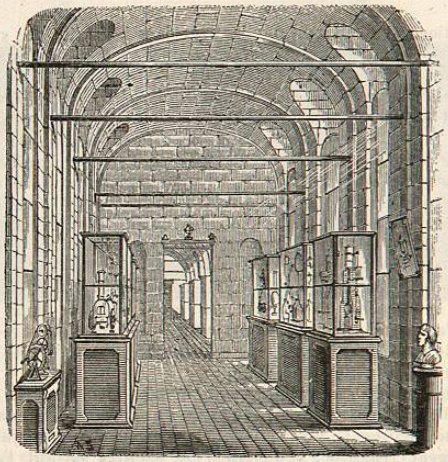

Fig. 685.

634. **Pendules compensateurs.** — L'inégale dilatation des métaux a reçu une importante application dans les *pendules compensateurs*. La dilatation inévitable de la tige y est *compensée* de manière que la distance entre le centre de suspension et le centre d'oscillation demeure indépendante de la température : ce qui est nécessaire, d'après les lois du pendule, pour que l'isochronisme persiste et pour que le pendule puisse servir de régulateur aux horloges. De nombreux systèmes ont été proposés pour compenser les pendules. Le suivant, dû à Leroy, est généralement adopté.

Pendule de Leroy ou *pendule à gril*. — 1° *Description*. — Dans cet appareil, la lentille L (fig. 686), au lieu d'être soutenue par une seule tige, l'est par une série de châssis emboîtés l'un dans l'autre, et dont les branches verticales sont alternativement des verges d'acier et de laiton. Les premières sont représentées plus foncées; il y en a cinq, plus une lame d'acier *b*, qui porte tout le pendule et se courbe à chaque oscillation; les autres, au nombre de quatre, sont en cuivre jaune. La tige *i*, qui porte la lentille L, est fixée, à sa partie supérieure, à une traverse horizontale; mais

à sa partie inférieure elle est libre et passe par deux trous cylindriques pratiqués dans les traverses inférieures.

Étant donnée la manière dont les tiges verticales sont liées entre elles par des traverses horizontales, l'allongement des tiges d'acier ne peut s'effectuer que de haut en bas, et, au contraire, celui des tiges de laiton de bas en haut. Par conséquent, pour que la longueur du pendule reste constante, il faut et il suffit que l'allongement des tiges de cuivre relève constamment la lentille juste de la même quantité dont l'allongement des tiges d'acier tend à l'abaisser.

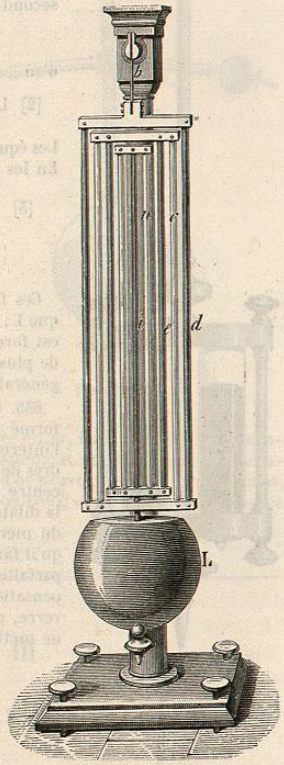

Fig. 686.

2° *Condition de compensation*. — Remarquons d'abord que toutes les tiges d'acier n'ajoutent pas leurs effets pour l'abaissement de la lentille, mais seulement la lame *b* et les tiges *d*, *e*, *i*; car les deux tiges d'acier, qui sont symétriques de *d* et de *e*, sur la gauche de la figure, sont liées respectivement à celles-ci par des traverses, de sorte que leurs allongements s'effectuent parallèlement à ceux de ces tiges sans s'y ajouter. La même remarque s'appliquant aux tiges de laiton, on n'a qu'à considérer les tiges *c* et *n*, placées d'un même côté de l'axe.

Cela posé, représentons par a, a', a'', a''' les longueurs des pièces d'acier *b*, *d*, *e*, *i*, et par c et c' celles des tiges de laiton c, n; posons $a + a' + a'' + a''' = l$ et $c + c' = l'$: ce qui veut dire que l est la longueur réelle d'acier utilisée pour la descente de la lentille, et l' la longueur de laiton utilisée pour son ascension. Si l'on appelle k et k' les coefficients de dilatation linéaire de l'acier et du cuivre jaune, les allongements des deux métaux, à t degrés, seront respectivement lkt et $l'k't$. Pour que la longueur totale L du pendule reste constante, il faut donc qu'on ait

$$lkt = l'k't, \quad \text{ou} \quad lk = l'k'. \qquad [1]$$

Telle est la *condition de compensation*. Elle signifie que, *dans le pendule compensateur, les longueurs totales de l'acier et du cuivre doivent être en raison inverse des coefficients de dilatation de ces métaux.*

De plus, cette égalité ne contenant pas t, on en conclut que *la compensation a lieu à toutes les températures.*

3° *Longueurs totales du laiton et de l'acier*. — Connaissant la longueur totale L du pendule (elle est ordinairement celle du pendule qui bat la seconde,

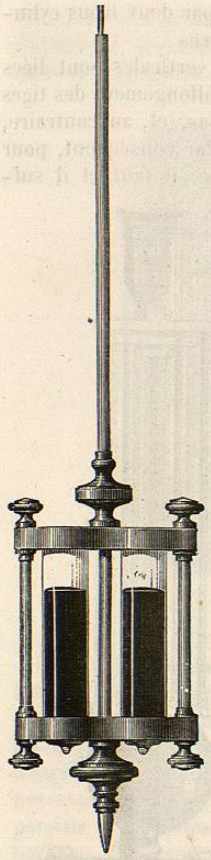

Fig. 687.

c'est-à-dire égale à $0^m,993866$), on peut déterminer les longueurs absolues l et l' de l'acier et du laiton nécessaires pour réaliser la compensation. Il suffit d'exprimer L en fonction de l et l'. Or on voit que la longueur totale du pendule se compose d'abord de la tige b, puis de la tige i (jusqu'au centre de la lentille), enfin des deux intervalles qui séparent les trois châssis. Or le premier de ces intervalles est évidemment égal à la différence des tiges d et c, et le second à la différence des tiges e et n. On a donc

$$L = a + a''' + (a' - c) + (a'' - c''),$$

d'où

$$[2] \quad L = (a + a' + a'' + a''') - (c + c') = l - l'.$$

Les équations [1] et [2] ci-dessus déterminent l et l'. En les résolvant, on trouve

$$[3] \quad l = \frac{L}{1 - \frac{k}{k'}} \quad \text{et} \quad l' = \frac{L}{\frac{k'}{k} - 1}.$$

Ces formules font voir que l et l' sont plus grands que L ; c'est pour satisfaire à cette condition qu'on est forcé, pour le pendule à seconde, de faire usage de plusieurs châssis d'acier et de laiton (k est pris généralement égal à 0,00001079 et k' à 0,00001878).

635. **Compensateur Graham.** — Ce pendule est formé d'une tige de fer (fig. 687) qui soutient, par l'intermédiaire d'un support en cristal, deux cylindres de cristal à peu près remplis de mercure. Le centre de gravité du pendule est donc abaissé par la dilatation de la tige, mais relevé par la dilatation du mercure. On calcule la hauteur de mercure qu'il faut employer pour obtenir une compensation parfaite. Graham, qui a inventé ce procédé de compensation, suspendait son pendule par une tige de verre, au lieu d'une tige de fer. On peut également ne mettre qu'un tube en verre au lieu de deux.

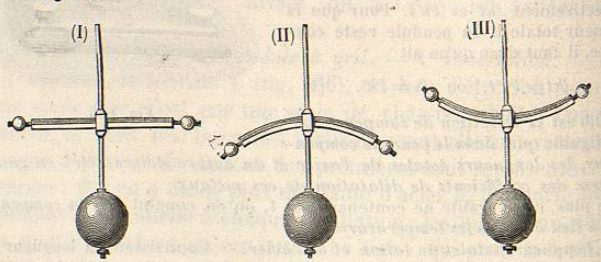

Fig. 688.

636. **Lames compensatrices. — Compensateur Martin.** — On arrive encore à compenser l'allongement de la tige des pendules au moyen de *lames compensatrices*. On nomme ainsi deux lames de cuivre et de fer soudées ensemble et fixées à la tige du pendule (fig. 688, I). La lame de cuivre qui est la plus dilatable, est au-dessous de la lame de fer. Quand la température s'abaisse, la tige du pendule se raccourcit et la lentille se relève ; mais alors les lames compensatrices se recourbent (fig. 688, II), ce qui est dû à ce que le cuivre se contracte plus que le fer. De la sorte, deux boules métalliques, placées à l'extrémité des lames, s'abaissent, et, si elles ont une masse convenable, il s'établit une compensation entre les points qui se rapprochent du centre de suspension et ceux qui s'en écartent, ce qui fait que le centre d'oscillation n'est pas déplacé. Si la température s'élève, la lentille descend, mais les boules remontent (fig. 688, III), et il y a encore compensation.

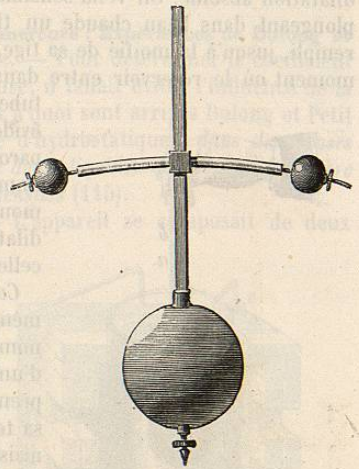

Fig. 689.

Tel est le principe du *compensateur Martin*. C'est un pendule ordinaire dont la tige porte un système de *lames compensatrices* (fig. 689) terminées par deux boules pesantes en or. On a calculé les dimensions de façon que la compensation soit parfaitement établie d'après le mécanisme indiqué ci-dessus. Comme les boules d'or peuvent glisser sur les lames, grâce aux vis de pression qui les y fixent, on peut, en les déplaçant, achever la compensation par tâtonnements.

CHAPITRE III

DILATATION DES LIQUIDES.

637. **Définitions préliminaires.** — *Dilatation apparente et dilatation absolue.* — Dans les liquides, il n'y a lieu de considérer que des dilatations cubiques ; mais l'on doit distinguer la *dilatation absolue* et la *dilatation apparente*. Cette dernière est l'accroissement de volume que *paraît* prendre un liquide dans une enveloppe qui se dilate moins que lui. Telle est la dilatation du mercure et de l'alcool qu'on observe dans les thermomètres. La