617. **Limites de l'emploi du thermomètre à mercure.** — Le mercure entre en ébullition à 350° et se congèle à — 39°. Ce sont donc là deux limites qu'on ne peut dépasser dans l'emploi du thermomètre à mercure. Mais l'expérience ayant appris que la dilatation du mercure n'est *régulière* (c'est-à-dire proportionnelle à l'élévation de la température) que de — 36° à 100°, et qu'au delà, depuis 100° jusqu'à 350°, son coefficient de dilatation va en croissant, il s'ensuit que le thermomètre à mercure ne donne des indications précises qu'entre — 36° à 100°. Pour les températures plus élevées, ses indications ne sont qu'approximatives et l'erreur peut s'élever à plusieurs degrés.

Du reste, il arrive souvent que deux thermomètres à mercure, qui sont d'accord à 0° et à 100°, ne le soient pas entre ces deux points, quoique placés dans les mêmes conditions. Cela résulte de ce que tous les verres, n'ayant pas la même composition chimique, ne sont pas également dilatables. Et comme on n'observe dans le thermomètre qu'une *dilatation apparente* du mercure, c'est-à-dire *l'excès de sa dilatation absolue sur celle du verre*, lorsque deux thermomètres ne sont pas formés d'un verre identique, il doit y avoir généralement des différences dans la marche des colonnes mercurielles : c'est ce qu'on exprime en disant que les instruments ne sont pas *comparables*.

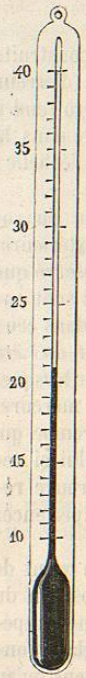

Fig. 669.

618. **Conditions de sensibilité.** — On peut considérer la sensibilité d'un thermomètre sous deux points de vue. En effet, un thermomètre est *sensible :* 1° lorsqu'il accuse de très petites variations de température; 2° quand il se met promptement en équilibre de température avec les corps ambiants.

On obtient le premier genre de sensibilité en donnant au thermomètre une tige très capillaire, soudée à un réservoir un peu gros. La marche du mercure dans la tige est alors limitée à un petit nombre de degrés, par exemple de 10 à 20, ou de 20 à 30, et chaque degré occupe une grande longueur sur la tige ce qui donne le moyen d'évaluer des fractions de degré très petites. Avec dix thermomètres de ce genre, dont chacun comprendra 10 degrés de 0° à 10°, de 10° à 20°, etc., on pourra mesurer, avec une grande précision, toute température comprise entre 0° et 100° (fig. 669). C'est ce qu'on appelle une série de *thermomètres à échelles fractionnées.*

Le second genre de sensibilité se réalise en donnant au thermomètre un très petit réservoir; car moins le mercure a de masse, plus il prend rapidement la température du milieu dans lequel il se trouve.

619. **Thermomètre à alcool.** — Le *thermomètre à alcool* contient, au lieu de mercure, de l'alcool coloré en rouge avec de

l'orseille. Le remplissage en est facile, parce que ce liquide bout à la température peu élevée de 79°.

Construction. — Après avoir chauffé légèrement le réservoir, pour faire sortir un peu d'air, on plonge l'extrémité ouverte de la tige dans l'alcool coloré en rouge; par le refroidissement, l'air qui reste dans le réservoir se contracte, et la pression atmosphérique y fait monter une petite quantité d'alcool (fig. 670). On chauffe alors jusqu'à l'ébullition : les vapeurs d'alcool qui se dégagent entraînent tout l'air qui se trouve dans le réservoir et dans la tige. Il suffit ensuite, après quelques instants d'ébullition, de retourner brusquement le thermomètre et d'en plonger de nouveau l'extrémité dans l'alcool. Les vapeurs se condensent, le vide se fait à l'intérieur et, par l'effet de la pression atmosphérique, le réservoir et la tige se remplissent complètement. Toutefois, l'alcool qui pénètre dans le réservoir s'échauffant, l'air qui y était en dissolution se dégage, et une petite bulle gazeuse apparait. Pour l'expulser, on attache l'extrémité de la tige à une petite corde, et on fait tourner rapidement l'instrument comme une fronde. Par l'effet de la force centrifuge, l'alcool, qui a le plus de masse, est refoulé vers la boule et en chasse la bulle d'air; enfin l'on chauffe doucement jusqu'à faire sortir la moitié ou les deux tiers du liquide contenu dans la tige, puis on en soude l'extrémité à la lampe, mais en ayant soin d'y laisser de l'air. Celui-ci est destiné à retarder, par sa force élastique, le point d'ébullition de l'alcool, et à empêcher, lorsqu'on incline le tube, que la colonne liquide ne se divise en plusieurs tronçons.

Fig. 670.

Graduation. — On prend le zéro dans la glace fondante, comme pour le thermomètre à mercure; mais pour point supérieur de l'échelle on ne peut prendre la température de l'eau bouillante, car l'alcool bout à 79°, et, au delà, sa vapeur pourrait acquérir une tension capable de briser le tube. C'est pourquoi la graduation se fait par comparaison avec un thermomètre étalon à mer-

cure, et en prenant seulement pour limite supérieure de l'échelle 60 ou 70°. A cet effet, on chauffe lentement, dans un même bain, le thermomètre à mercure et le thermomètre à alcool, et l'on marque successivement sur ce dernier les températures données par le thermomètre à mercure. Ainsi gradué, le thermomètre à alcool est *comparable* au thermomètre à mercure, c'est-à-dire qu'il donne les mêmes températures lorsqu'il est placé dans les mêmes conditions.

Le thermomètre à alcool a été adopté pour mesurer les très basses températures, parce que jusqu'à ces derniers temps on l'avait cru absolument incongelable. Toutefois, aux plus basses températures connues, l'alcool a l'inconvénient de devenir sirupeux; de plus, les différents alcools n'ayant pas le même degré d'hydratation, on a vu des thermomètres à alcool, exposés à un refroidissement égal, différer de plusieurs degrés. Pour obvier à ce double inconvénient, on a proposé de remplacer l'alcool par le *sulfure de carbone*, liquide qui ne contient point d'eau et conserve la même fluidité aux plus basses températures; mais M. I. Pierre a fait voir que les liquides qu'on doit préférer sont l'éther sulfurique et le chlorure d'éthyle.

620. **Thermomètres différentiels.** — Leslie, physicien écossais, a construit le premier un thermomètre destiné à faire connaître la différence des températures en deux points voisins; de là son nom de *thermomètre différentiel*.

1° *Thermomètre de Leslie.* — C'est un *thermomètre à air*. Il se compose de deux boules de verre égales, remplies d'air et réunies par un tube recourbé, d'un petit diamètre, fixé sur une planchette (fig. 671). Avant que l'appareil soit fermé, on y introduit un liquide coloré, en quantité suffisante pour remplir la branche horizontale du tube et la moitié environ des branches verticales. Il importe de choisir un liquide qui ne donne pas de vapeur aux températures ordinaires; c'est pourquoi on fait usage d'acide sulfurique coloré en rouge. L'appareil étant ensuite fermé, on fait passer de l'air d'une boule dans l'autre, en les échauffant inégalement, jusqu'à ce que, la température étant redevenue la même des deux côtés, le niveau soit à la même hauteur dans les branches verticales : on n'y parvient qu'après quelques tâtonnements. On marque alors zéro à chaque

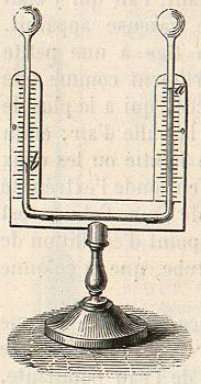

Fig. 671.

extrémité de la colonne liquide. Pour continuer la graduation, on maintient l'une des boules à la température de zéro, et l'autre à 10°. L'air de la dernière se dilate et refoule la colonne liquide *ba*, qui s'élève dans l'autre branche. Lorsque cette colonne est devenue stationnaire, on marque 10, de chaque côté, aux niveaux du liquide dans chaque branche ; puis on partage les intervalles de zéro à 10 en dix parties égales, et l'on continue les divisions au-dessus et au-dessous du zéro.

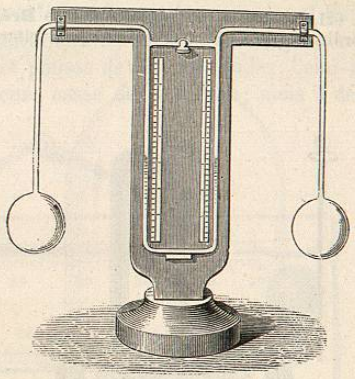

Fig. 672.

2° *Thermomètre de Matthiessen.* — La figure 672 représente la disposition que Matthiessen a donnée au thermomètre différentiel pour l'appliquer à la mesure des températures de deux liquides.

3° *Thermoscope de Rumford.* — Cet instrument diffère peu du thermomètre de Leslie et fut construit par le physicien Rumford presque à la même époque. Les boules en sont plus grosses, la branche horizontale est plus grande et porte la graduation. L'index E (fig. 673) n'a que deux centimètres de longueur environ, et l'on marque encore un zéro à chaque extrémité, lorsque, les deux boules étant à la même température, il occupe le milieu de la branche horizontale. La graduation se fait ensuite absolument comme pour le thermomètre de Leslie. Un appendice D sert à régler l'appareil : lorsqu'il y a trop d'air du côté de l'une des boules, on fait passer l'index dans l'appendice, ce qui permet à l'air de se rendre dans l'autre

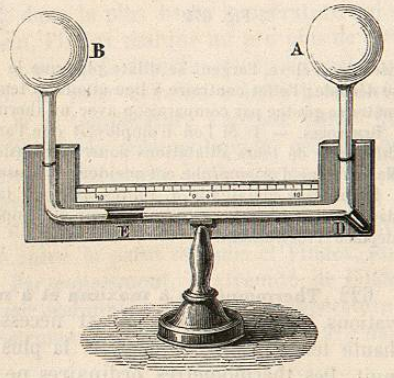

Fig. 673.

boule. Il suffit ensuite d'incliner le thermomètre pour faire rentrer l'index et lui faire reprendre sa position normale.

621. **Thermomètre métallique de Bréguet.** — Parmi les thermomètres ordinaires (ou thermoscopes) on peut citer un thermomètre entièrement métallique, construit par Abraham Bréguet, et qui est remarquable par sa grande sensibilité.

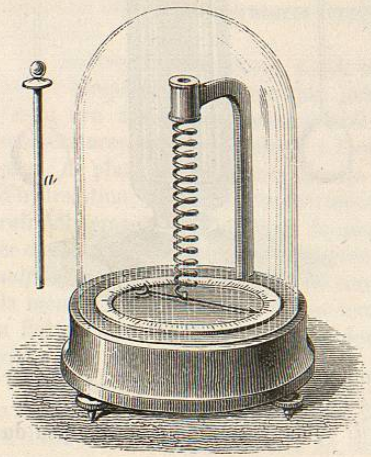

Fig. 674.

Le principe de cet instrument est l'*inégale dilatabilité des métaux*. Il est formé de trois lames superposées, de platine, d'or et d'argent. Soudées ensemble sur toute leur longueur, elles sont ensuite passées au laminoir de manière à ne former qu'un ruban métallique très mince. On contourne ce ruban en hélice, puis on en fixe l'extrémité supérieure à un support, et l'on suspend à l'autre extrémité une aiguille légère de cuivre, libre de se mouvoir sur un cadran horizontal qui porte une échelle centigrade (fig. 674).

L'argent, qui est le plus dilatable des trois métaux, forme la face intérieure de l'hélice; le platine, qui est le moins dilatable, est à l'extérieur, et l'or est entre les deux. Lorsque la température s'élève, l'argent se dilate plus que le platine et que l'or, et l'hélice se déroule; l'effet contraire a lieu quand la température s'abaisse. Ce thermomètre se gradue par comparaison avec un thermomètre étalon à mercure.

Remarques. — 1° Si l'on n'employait que l'argent et le platine, la grande différence de leurs dilatations pourrait occasionner une rupture de l'hélice. Mais la lame d'or empêche cet accident, à cause de sa dilatation intermédiaire.

2° Une tige métallique *a*, représentée sur la gauche de la figure, se met dans l'axe de l'hélice, pour la soutenir et l'empêcher de se déformer lorsqu'on déplace l'instrument.

622. **Thermomètres à maxima et à minima.** — Dans les observations météorologiques, il est nécessaire de connaître la plus haute température du jour et la plus basse température de la nuit. Des thermomètres ordinaires ne pourraient conduire à la connaissance de ces températures que par une observation continue, ce qui serait tout à fait impraticable. Aussi a-t-on imaginé, pour ce genre de mesures, des instruments particuliers, dits *thermomètres à maxima* et *à minima*.

Thermomètres de Rutherford. — Les plus simples sont ceux de Rutherford. Sur une glace sont fixés deux thermomètres dont les

tiges sont recourbées horizontalement. Dans le premier, qui est à mercure, il y a un petit cylindre de fer A (fig. 675), qui peut glisser librement dans le tube. Ce cylindre, qui sert d'index, étant mis en contact avec l'extrémité de la colonne de mercure, et l'instrument étant disposé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure se dilate et pousse devant lui l'index. Celui-ci s'arrête aussitôt que le mercure cesse de se dilater; mais il de-

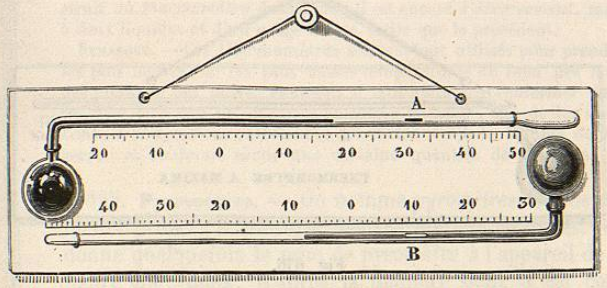

Fig. 675.

meure au même point de la tige lorsque le mercure se contracte, parce qu'il n'y a pas adhérence entre ce liquide et le fer. Le point où s'arrête l'index marque donc la plus haute température qui se soit produite. (Sur le dessin, l'index marque un peu plus de 30°.)

Dans le *thermomètre à minima*, le liquide est de l'alcool dans lequel plonge entièrement un petit cylindre d'émail B destiné à servir d'index (fig. 675). Si la température s'abaisse tandis que le cylindre est à l'extrémité de la colonne liquide, celle-ci, qui mouille l'émail et y adhère légèrement, l'entraîne avec elle en se contractant : l'index avance ainsi jusqu'au point où a lieu le maximum de contraction du liquide. Quant la température s'élève, l'alcool se dilate et passe entre la paroi du tube et l'index, sans que celui-ci se déplace. Par conséquent, l'extrémité de l'index la plus éloignée du réservoir indique la plus basse température à laquelle ait été porté l'instrument. (C'est à peu près — $9^{\circ}\frac{1}{2}$ dans le dessin ci-dessus.)

625. **Thermomètre à maxima de Negretti et Zambra.** — Le thermomètre à maxima de Rutherford présente l'inconvénient de n'être pas portatif. Si on le meut brusquement, le petit index de fer s'engage dans le mercure et alors, quand ce liquide se dilate, il ne chasse plus devant lui l'index, mais passe dans l'intervalle qui existe entre celui-ci et le verre. L'index reste alors immobile, et le thermomètre ne fonctionne plus.

Pour éviter cet inconvénient, Negretti et Zambra ont modifié cet instrument.

Ayant introduit dans le tube du thermomètre un petit index de verre *ad* (fig. 676), ils chauffent à la lampe et courbent le tube, au point même où est l'index; de cette manière celui-ci est fixe, mais cependant il n'obstrue pas le tube et ne s'oppose pas à la dilatation du mercure qui est dans le réservoir.

Le thermomètre étant placé horizontalement, lorsque la température s'élève, le mercure du réservoir se dilate, passe entre l'index et les parois du tube, et avance, par exemple, jusqu'en *c*; mais lorsqu'il y a ensuite abaissement de température et contraction du mercure, la résistance que celui-ci éprouve

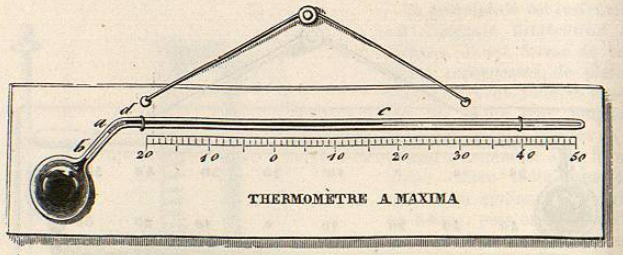

Fig 676.

pour repasser entre l'index et le tube l'emporte sur la cohésion des molécules de mercure entre elles, la colonne *dc* reste en place, et le vide se fait de *a* en *b*. On a donc en *c* la température maxima à laquelle l'instrument a été porté. Pour ramener ensuite le mercure au-dessous de l'index, il n'y a qu'à tenir un instant le tube dans une position verticale, le mercure passe en vertu de son poids.

Quant à l'erreur qui peut résulter du refroidissement de la colonne de mercure *cd* au moment où l'on consulte le thermomètre, elle peut être négligée; car, en calculant d'après les formules des dilatations (631, IV), on trouve que, pour un refroidissement de 25°, elle ne peut dépasser 1 dixième de degré.

624. **Thermomètre à maxima de Walferdin,** ou **Thermomètre à déversement.** — Ce thermomètre, dit *à déversement*, a la forme d'un thermomètre à mercure ordinaire. Seulement, à la partie supérieure, il est muni d'un petit réservoir ou *panse*, où la tige pénètre et se termine par une pointe effilée et ouverte (fig. 677).

Préparation de l'instrument. — Dans cette panse est du mercure destiné à *amorcer* l'instrument, c'est-à-dire à remplir complètement la tige à chaque observation. Pour cela, on chauffe le réservoir inférieur jusqu'à ce que le mercure, en se dilatant, commence à sortir par la pointe effilée. On retourne alors l'instrument, le mercure qui est dans la panse descend vers la pointe et celle-ci y plonge en entier; puis on laisse le thermomètre se refroidir lentement, en ayant soin de le tenir toujours renversé. Par le refroidissement, le mercure du réservoir se contracte, et, par un effet de cohésion, il en passe une certaine quantité de la panse dans la tige, et celle-ci se trouve complètement remplie.

Usage. — Pour faire usage de cet instrument, on commence par l'amorcer a une température inférieure à celle qu'il s'agit d'observer, puis on le place dans le lieu dont on veut connaître le maximum de la température. S'il vient d'abord à se refroidir, il n'y a aucun inconvénient, puisqu'il n'entre ni ne sort de mercure. Mais si la température s'élève, le mercure se dilate, une partie se

déverse dans la panse sans pouvoir rentrer dans le thermomètre, parce que celui-ci est alors dans la position représentée dans la figure 677. Pour déterminer ensuite la plus haute température à laquelle l'instrument a été porté, on le compare à un thermomètre étalon, en le chauffant à côté de celui-ci, dans un même bain, jusqu'à ce que le mercure remonte au sommet de la tige et soit prêt à en sortir. Consultant alors le thermomètre étalon, on a très approximativement, par une simple lecture, la température la plus haute à laquelle ait été porté le thermomètre à maxima.

Thermomètre à minima de Walferdin. — Walferdin a aussi construit un *thermomètre à minima;* il est encore *à déversement*, mais à deux liquides et d'un usage moins facile que le précédent.

Remarque. — Ces thermomètres sont surtout utilisés pour prendre les plus hautes ou les plus basses températures du fond des lacs, des mers ou des puits. Toutefois il faut alors les renfermer dans un tube de verre qu'on soude ensuite à la lampe, afin de les soustraire à la pression extérieure, qui diminuerait le volume du réservoir et en ferait sortir une certaine quantité de mercure.

625. **Pyromètres.** — On nomme *pyromètres* des instruments propres à mesurer les hautes températures. On donne quelquefois le nom de pyromètre à l'appareil de la figure 660; mais, d'après la manière dont il est construit, ce n'est réellement qu'un *pyroscope*.

Brongniart avait fait construire, pour la Manufacture de porcelaine de Sèvres, un pyromètre (fig. 678) qui avait du rapport avec l'appareil de la figure 660. Cet instrument fut d'ailleurs abandonné du vivant même de

Fig. 677.

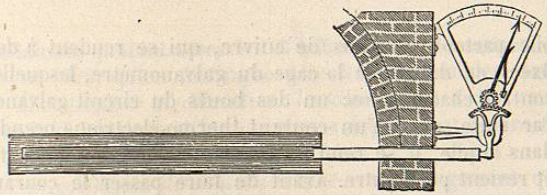

Fig. 678.

son auteur, parce qu'il ne donnait pas d'indications précises.

On a longtemps décrit dans les traités de physique le pyromètre de Wedgwood, fondé sur la propriété qu'a l'argile de se contracter lorsqu'elle est portée à une température élevée. Mais cet instrument, aussi bien que les précédents, manque absolument de précision; de plus, ils ne sont pas comparables.

Les seuls pyromètres précis sont le *pyromètre à air* et le *pyromètre électrique :* nous les décrirons plus loin.

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

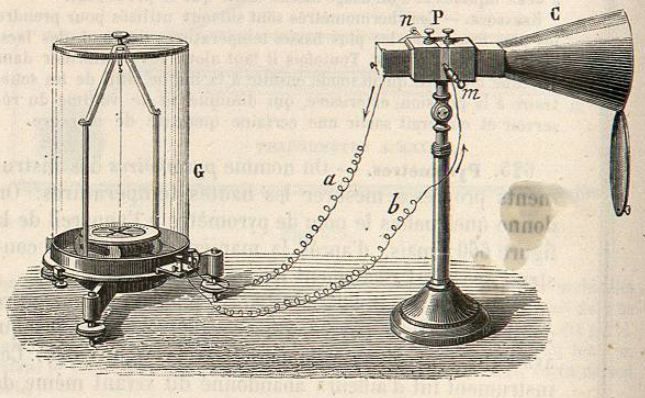

Fig. 679.

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