

372. **Applications de la conductibilité.** — La plus ou moins grande conductibilité des corps rencontre de nombreuses applications. S'agit-il, par exemple, de conserver un liquide longtemps chaud, on l'enferme dans un vase à double enveloppe dont l'intervalle est rempli de matières non conductrices, comme la sciure de bois, le verre, le charbon pilé, la paille. On emploie le même moyen pour empêcher un corps d'absorber le calorique : c'est ainsi que, pour conserver de la glace dans la saison chaude, on l'entoure de paille ou d'une couverture de laine.

Dans nos habitations, si les carreaux nous paraissent plus froids que le parquet, c'est qu'ils conduisent mieux le calorique. La sensation de chaleur ou de froid que nous ressentons au contact de certains corps est due à la conductibilité. Si leur température est moins élevée que la nôtre, ils nous paraissent plus froids qu'ils ne sont, à cause du calorique qu'ils nous enlèvent en vertu de leur conductibilité : c'est ce qui a lieu pour le marbre. Si, au contraire, leur température est supérieure à celle de notre corps, ils nous semblent plus chauds qu'ils ne sont, par le calorique qu'ils nous cèdent des divers points de leur masse : c'est le phénomène que nous présente une barre de fer exposée au soleil.

CHAPITRE IX.

RAYONNEMENT DU CALORIQUE.

373. **Propagation du calorique dans un milieu homogène.** — Lorsqu'un corps est placé dans une enceinte dont la température est plus ou moins élevée que la sienne, on observe toujours que la température du corps s'élève ou s'abaisse progressivement, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'enceinte ; d'où l'on conclut que le corps a gagné ou perdu une certaine quantité de chaleur qu'il a reçue des corps voisins ou qu'il leur a cédée. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre, à travers l'espace, de la même manière que la lumière. Le calorique qui se propage ainsi à distance se désigne sous le nom de *calorique rayonnant*, et l'on appelle *rayon de chaleur* ou *rayon calorifique*, la ligne droite que suit le calorique en se propageant.

La chaleur se transmet aussi dans la masse même des corps : c'est alors un véritable rayonnement intérieur de molécule à molécule qui se produit, phénomène qui a déjà été étudié (367) sous le nom de *conductibilité*.

374. **Lois du rayonnement.** — Le rayonnement du calorique présente les trois lois suivantes :

1^o *Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour des corps.* En effet, si l'on place un thermomètre dans différentes positions autour d'un corps chaud, il indique, dans toutes, une élévation de température.

2^o *Dans un milieu homogène le rayonnement se fait en ligne droite.* Car, si l'on interpose un écran sur la droite qui joint une source calorifique à un thermomètre, celui-ci cesse d'être influencé par la source.

Mais en passant d'un milieu dans un autre, de l'air dans le verre, par exemple, les rayons calorifiques, de même que les rayons lumineux, sont déviés, phénomène qu'on désigne sous le nom de *réfraction*, et dont on verra les lois en optique, ces lois étant les mêmes pour la lumière que pour le calorique.

3^o *Le calorique rayonnant se propage dans le vide comme dans l'air.* On le démontre en fixant un petit thermomètre dans un ballon de verre soudé à un tube barométrique (fig. 263). Un vide parfait existant dans ce ballon, si l'on approche un corps chaud, on voit le thermomètre monter, phénomène qui ne peut être attribué qu'au rayonnement dans le vide ; car on a vu (367) que le verre ne conduit pas assez bien le calorique pour que la propagation puisse s'opérer par les parois du ballon et par la tige du thermomètre.

Quant à la vitesse de propagation du calorique, elle n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas exactement égale ; car la lumière solaire et la plupart des lumières artificielles sont constamment accompagnées de rayons de chaleur.

375. **Causes qui font varier l'intensité du calorique rayonnant.**

— En prenant pour *intensité du calorique* la quantité de chaleur reçue sur l'unité de surface, dans l'unité de temps, on trouve que trois causes peuvent modifier cette intensité : la température de la source de chaleur, sa distance, et l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet. On observe, en effet, les trois lois suivantes sur l'intensité du calorique rayonnant.

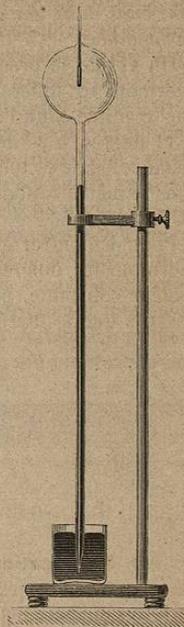


Fig. 263.

1° L'intensité du calorique rayonnant est proportionnelle à la température de la source.

2° Cette même intensité est en raison inverse du carré de la distance.

3° L'intensité des rayons calorifiques est d'autant moindre qu'ils sont émis dans une direction plus oblique par rapport à la surface rayonnante.

On vérifie la première loi en présentant une des boules d'un thermomètre différentiel (265) à des sources de chaleur variables, par exemple à un cube de fer-blanc rempli successivement d'eau à 30 degrés, à 20 degrés et à 10 degrés. On remarque alors qu'à distance égale le thermomètre marque des températures qui sont dans le même rapport que celles du cube, par exemple 6, 4, 2 (377, 2°).

Pour démontrer expérimentalement la seconde loi, on place le thermomètre différentiel à une certaine distance d'une source de chaleur constante, puis on le porte à une distance double, et l'on observe que le thermomètre, dans cette seconde position, indique une température quatre fois moindre que dans la première. A une distance triple, il marque une température neuf fois moindre.

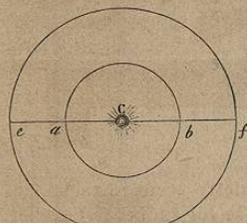


Fig. 264.

Cette seconde loi se démontre encore en s'appuyant sur ce théorème de géométrie, que la surface d'une sphère croît comme le carré de son rayon. En effet, si l'on conçoit une sphère creuse *ab* (fig. 264), d'un rayon quelconque, et à son centre une source de chaleur constante *C*, chaque unité de surface de la paroi intérieure reçoit une quantité déterminée de chaleur. Or, si l'on considère une sphère *ef*, de rayon double, sa surface, d'après le théorème cité, sera quatre fois plus grande. La paroi intérieure contiendra donc quatre fois plus d'unités de surface, et comme la quantité de chaleur émise du centre reste la même, chaque unité en recevra nécessairement quatre fois moins.

On constate la troisième loi par l'expérience suivante, due à Leslie. Au-devant d'un miroir concave, on place une caisse de fer-blanc *mn* (fig. 265), cylindrique et d'une faible épaisseur, laquelle peut s'incliner plus ou moins autour d'un axe horizontal. La face antérieure de cette caisse est couverte de noir de fumée, et sur son bord supérieur est une tubulure qui sert à la remplir d'eau chaude. Enfin, entre la caisse et le miroir sont deux écrans *H* et *K*, percés

d'ouvertures égales, et livrant ainsi passage à un faisceau de rayons parallèles qui tombent sur le miroir.

Cela posé, ayant placé un thermomètre différentiel au foyer du miroir, on donne d'abord à la caisse remplie d'eau chaude la position verticale figurée en lignes ponctuées, et on la laisse ainsi jusqu'à ce que la température marquée par le thermomètre soit devenue stationnaire; puis, donnant à la caisse la position inclinée *mn*, on attend que le thermomètre soit redevenu stationnaire. Or, dans

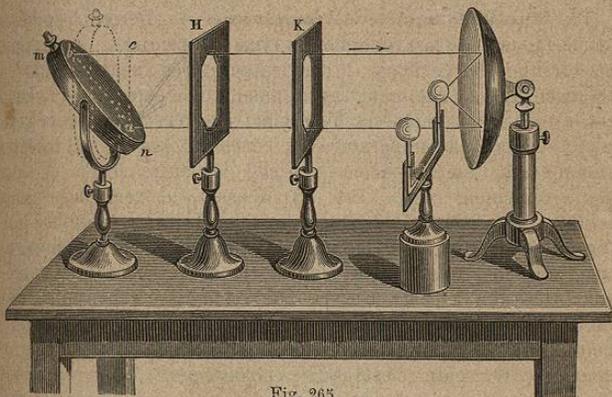


Fig. 265.

les deux cas, on observe que le thermomètre accuse exactement la même température, ce qui démontre la loi énoncée. En effet, dans le premier cas, la portion de la surface de la caisse qui envoie des rayons vers le miroir est représentée par un cercle ayant pour diamètre *ac*, et égal, par conséquent, à l'ouverture des écrans; dans le second, la surface qui rayonne vers le miroir est une ellipse ayant pour grand axe *ab* et pour petit axe le diamètre des écrans, c'est-à-dire *ac*; cette seconde surface est donc plus grande que la première, et, par suite, elle émet plus de rayons vers le miroir. Or, puisque l'effet produit sur le thermomètre n'est pas plus intense que dans le premier cas, cela montre que, dans le second, où les rayons sont obliques à la surface rayonnante, l'intensité est moindre que dans le premier, où ils sont perpendiculaires à la même surface.

Pour traduire en formule la loi ci-dessus, soient *i* l'intensité des rayons perpendiculaires à la surface, et *i'* celle des rayons obliques. Ces intensités étant nécessairement en raison inverse des surfaces *ab* et *ac*, puisque l'effet est le même pour toutes deux, on a $i' \times \text{surf. } ab = i \times \text{surf. } ac$. Or, la surface *ac* n'étant autre

chose que la projection de la surface ab , on sait, d'après un théorème connu en trigonométrie, que $\text{surf. } oc = \text{surf. } ab \times \cos bac$. Portant cette valeur dans l'égalité ci-dessus et supprimant le facteur $\text{surf. } ab$, commun aux deux membres, on a $i' = i \times \cos bac$; d'où l'on conclut que l'intensité des rayons obliques est proportionnelle au cosinus de l'angle formé par ces rayons avec la normale à la surface; car il est facile de reconnaître que cet angle est le même que l'angle bac . Cette loi, connue sous le nom de loi du cosinus, n'est pas générale; en effet, MM. Descans et de la Provostaye ont constaté qu'elle ne se vérifie que dans un cas très-retréint, celui où les corps sont, comme le noir de fumée, dénués de pouvoir réflecteur (383).

376. Équilibre mobile de température. — Deux hypothèses ont été faites sur le rayonnement. Dans la première, on suppose que lorsque deux corps, à des températures inégales, sont en présence, il y a seulement rayonnement du corps le plus chaud vers le plus froid, celui-ci n'émettant rien vers le premier; cela, jusqu'à ce que la température du corps le plus chaud, baissant graduellement, soit la même que celle de l'autre corps, et alors tout rayonnement cesse. Cette hypothèse a été remplacée par la suivante, due à Prévost de Genève, et la seule admise aujourd'hui. D'après ce savant, tous les corps, quelle que soit leur température, émettent constamment du calorique dans toutes les directions. Alors il y a perte, c'est-à-dire refroidissement, pour ceux dont la température est la plus élevée, parce que les rayons qu'ils émettent ont une plus grande intensité que ceux qu'ils reçoivent. Au contraire, il y a gain, c'est-à-dire échauffement, pour ceux dont la température est la moins élevée. Il vient ainsi un moment où la température est la même de part et d'autre; mais alors il y a encore échange de calorique entre les corps, seulement chacun reçoit autant qu'il émet; c'est pourquoi la température reste constante. C'est cet état particulier qu'on désigne sous le nom d'équilibre mobile de température.

377. Loi de Newton sur le refroidissement. — Un corps placé dans une enceinte vide ne se refroidit ou ne s'échauffe que par rayonnement. Dans l'atmosphère, il se refroidit ou s'échauffe par rayonnement et par son contact avec l'air. Dans les deux cas, la vitesse de refroidissement ou d'échauffement, c'est-à-dire la quantité de chaleur perdue ou absorbée dans une seconde, est d'autant plus grande, que la différence de température est plus considérable.

Newton a posé sur le refroidissement et l'échauffement des corps la loi suivante : La quantité de chaleur qu'un corps perd ou gagne, par seconde, est proportionnelle à la différence entre sa température et celle de l'enceinte. Dulong et Petit ont fait voir que cette loi n'est pas générale, comme l'avait supposé Newton, et qu'on ne

doit l'appliquer qu'à des différences de température qui ne dépassent pas 15 à 20 degrés. Au delà, la quantité de chaleur perdue ou absorbée est plus grande que la loi ne l'indique.

On tire de la loi de Newton les conséquences suivantes :

1^o Lorsqu'un corps est exposé à une source de chaleur constante, sa température ne saurait s'élever indéfiniment; car la quantité de chaleur qu'il reçoit en temps égaux est toujours la même, tandis que celle qu'il perd croît avec l'excès de sa température sur celle de l'air ambiant. Il vient donc un moment où la quantité de chaleur émise égale celle qui est absorbée, et la température est alors stationnaire.

2^o La loi de Newton, appliquée au thermomètre différentiel, fait voir que les indications de cet instrument sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Soit, en effet, un thermomètre différentiel dont l'une des boules reçoit les rayons émis par une source constante : l'instrument indique d'abord des températures croissantes, puis devient bientôt stationnaire, ce qu'on reconnaît à la position fixe que prend l'index. A ce moment, la quantité de chaleur que reçoit la boule égale celle qu'elle émet. Mais cette dernière, d'après la loi de Newton, est proportionnelle à l'excès de la température de la boule sur celle de l'enceinte, c'est-à-dire au nombre de degrés marqué par le thermomètre; donc la température indiquée par le thermomètre différentiel est aussi proportionnelle à la quantité de chaleur qu'il reçoit.

RÉFLEXION, ÉMISSION ET ABSORPTION DU CALORIQUE.

378. Lois de la réflexion. — Lorsque des rayons calorifiques tombent sur la surface d'un corps, ils se partagent généralement en deux parties : les uns pénètrent dans la masse du corps, les autres se relèvent comme repoussés par la surface, à la manière d'une bille élastique; ce qu'on exprime en disant qu'ils sont réfléchis.

Si l'on représente par mn (fig. 266) une surface plane réfléchissante, par CB le rayon incident, par BD une ligne perpendiculaire à la surface, qu'on nomme normale, par BA le rayon réfléchi, l'angle CBD est dit l'angle d'incidence, et DBA l'angle de réflexion. Cela posé, la réflexion du calorique, de même que celle de la lumière, est soumise aux deux lois suivantes :

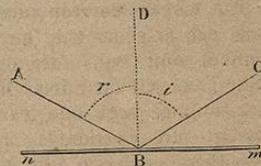


Fig. 266.

1° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

2° Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

On va voir ci-après que ces deux lois se démontrent expérimentalement au moyen des miroirs concaves (380).

379. **Réflexion sur les miroirs concaves.** — On nomme *miroirs concaves* ou *réflecteurs*, des surfaces sphériques ou paraboliques, de métal ou de verre, qui servent à concentrer en un même point des rayons lumineux ou calorifiques.

Nous ne considérerons que les miroirs sphériques. La figure 268 représente deux de ces miroirs; la figure 267 en donne une coupe médiane, qu'on nomme *section principale*. Le centre C de la

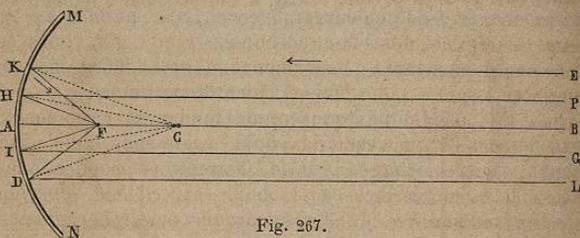


Fig. 267.

sphère à laquelle le miroir appartient se nomme *centre de courbure*; le point A, milieu du réflecteur, est le *centre de figure*; enfin, la droite AB, menée par ces deux points, est l'*axe principal* du miroir.

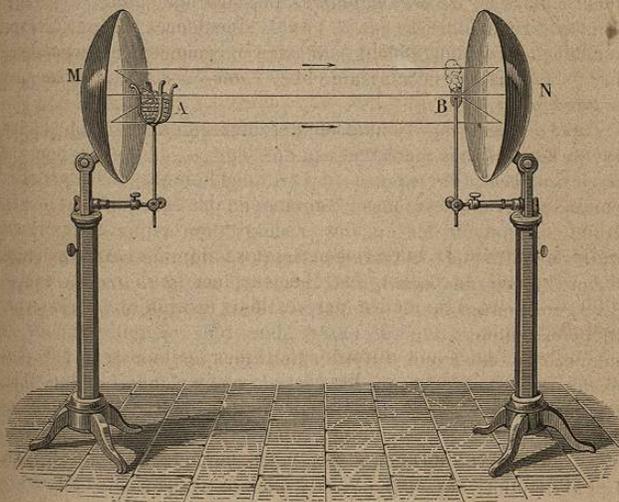
Afin d'appliquer aux miroirs sphériques les lois de la réflexion sur les surfaces planes, on les regarde comme formés d'une infinité de surfaces planes infiniment petites, appartenant chacune au plan tangent correspondant; cette hypothèse permet de conclure, par la géométrie, que les normales à ces petites surfaces viennent toutes concourir au centre de courbure.

Sur l'axe AB du miroir MN, supposons une source de chaleur assez éloignée pour que les rayons EK, PH..., qui en émanent, puissent être considérés comme parallèles entre eux. D'après l'hypothèse ci-dessus que le miroir est formé d'une infinité de petits éléments plans, le rayon EK se réfléchit sur l'élément K absolument comme sur un miroir plan; c'est-à-dire que, CK étant la normale à cet élément, le rayon prend une direction KF, telle que l'angle CKF est égal à l'angle CKE. Les autres rayons PH, GI..., se réfléchissant de la même manière, tous ces rayons, après leur réflexion, vont très-sensiblement concourir en un même

point F situé sur le milieu de AC, ainsi qu'il sera démontré en optique. Il y a donc, en F, réunion des rayons calorifiques, et, par conséquent, une plus grande élévation de température qu'en tout autre point. De là le nom de *foyer* qu'a reçu ce point. La distance FA du foyer au miroir s'appelle la *distance focale*.

Dans la figure ci-dessus, le calorique se propage suivant les lignes EK, LDF..., dans le sens des flèches; mais réciproquement, si le corps chaud est placé en F, le calorique se propage suivant les lignes FKE, FDL..., les rayons émis du foyer devenant, après la réflexion, parallèles entre eux; d'où il résulte que la chaleur transmise tend alors à conserver la même intensité.

380. **Démonstration des lois de la réflexion.** — L'expérience suivante, faite pour la première fois, à Genève, par Pictet et Saus-

Fig. 268 (h = 1^m,50).

sure, et connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués*, démontre non-seulement l'existence des foyers, mais en même temps les lois de la réflexion du calorique. Deux réflecteurs M et N (fig. 268) sont disposés à 4 ou 5 mètres de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un d'eux, dans un petit panier de fil de fer A, on place des charbons incandescents; au foyer de l'autre est un corps inflammable B, de l'amadou par exemple. Les rayons émis par la source A se réfléchissent une

première fois sur le miroir M au foyer duquel est cette source. Ayant pris, par l'effet de cette réflexion, une direction parallèle à l'axe (379), les rayons viennent se réfléchir une seconde fois sur l'autre réflecteur et concourir en son foyer B. Ce qui le prouve, c'est que le morceau d'amadou placé en ce point prend feu, tandis qu'en deçà ou au delà du foyer il ne s'enflamme pas.

Cette expérience sert en outre à démontrer que le calorique et la lumière se réfléchissent suivant les mêmes lois. Pour cela, on place au foyer A une bougie allumée, et au foyer B un écran de verre dépoli, et l'on observe, sur celui-ci, un foyer lumineux exactement où s'enflamme l'amadou; ce qui fait voir que le foyer lumineux et le foyer calorifique se forment au même point. La réflexion a donc lieu, dans les deux cas, suivant les mêmes lois. Or, il sera démontré plus tard que, pour la lumière, l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, et que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante (440); *donc il en est de même pour le calorique.*

C'est en raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves qu'on leur a donné le nom de *miroirs ardents*. On rapporte qu'Archimède embrasa les vaisseaux romains, devant Syracuse, au moyen de semblables miroirs. Buffon a construit des miroirs ardents dont la puissance prouve que le fait attribué à Archimède est possible. Ces miroirs étaient formés d'un grand nombre de glaces planes et étamées, longues de 22 centimètres sur 16 de large. Elles pouvaient être tournées indépendamment l'une de l'autre dans telle ou telle direction, de manière que les rayons réfléchis sur chacune vinssent concourir en un même point. Avec 128 glaces, par un soleil ardent d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

381. Réflexion dans le vide. — Le calorique se réfléchit dans le vide comme dans l'air. Pour le démontrer, on fait l'expérience suivante due à Davy, en Angleterre. Sous le récipient de la machine pneumatique, on dispose deux petits réflecteurs en regard l'un de l'autre. Au foyer de l'un est un thermomètre très-sensible, et au foyer de l'autre une source de chaleur électrique consistant en un fil de platine qu'on rend incandescent en y faisant passer le courant d'une pile. On voit le thermomètre monter aussitôt de plusieurs degrés, phénomène qui est bien dû au calorique réfléchi; car le thermomètre n'accuse plus la même élévation de température, s'il n'est pas exactement au foyer du second réflecteur.

382. Réflexion apparente du froid. — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre, comme les représente la figure 268, et qu'au lieu de charbons incandescents on place au foyer de l'un d'eux une certaine masse de glace, l'air ambiant étant à 12 ou 15 degrés, par exemple, on observe qu'un thermomètre différentiel, placé au foyer de l'autre réflecteur, indique un refroidissement de plusieurs degrés. Ce phénomène semble d'abord résulter de rayons frigorifiques émis par la glace. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelle, s'explique d'après ce qui a été dit (376) de l'équilibre de température qui tend toujours à s'établir entre les corps. Il y a encore échange de calorique, de même que dans l'expérience où l'on enflamme l'amadou; seulement les rôles sont changés: c'est ici le thermomètre qui est le corps chaud. Comme les rayons qu'il émet sont plus intenses que ceux émis par la glace, il n'y a pas compensation entre la chaleur qu'il cède et celle qu'il reçoit; de là son refroidissement.

C'est au même fait qu'il faut rapporter le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et, en général, près de toute masse dont la température est inférieure à la nôtre.

383. Pouvoir réflecteur. — Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est sa propriété de renvoyer une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

Le pouvoir réflecteur est variable d'une substance à une autre. Afin d'étudier ce pouvoir sur diverses substances, sans avoir besoin d'en construire autant de réflecteurs, Leslie disposa ses expériences comme le montre la figure 269. La source de chaleur est un cube M rempli d'eau à 100 degrés. Sur l'axe d'un réflecteur sphérique N, entre le foyer et le miroir, est fixée une plaque *a* de la substance dont on cherche le pouvoir réflecteur. Avec cette disposition, les rayons émis par la source et réfléchis une première fois sur le miroir rencontrent la plaque *a*, s'y réfléchissent de nouveau et viennent former leur foyer entre la plaque et le miroir, en un point où l'on place la boule d'un thermoscope. Or, le réflecteur et le thermoscope restant les mêmes, et l'eau du cube étant toujours à 100 degrés, on observe que la température accusée par le thermoscope varie avec la nature des plaques *a* qui sont en expérience; d'où l'on déduit, non pas le pouvoir réflecteur absolu d'un corps, mais le rapport de ce pouvoir à celui d'un autre corps pris pour terme de comparaison. En effet, conformément à ce qui a été dit (377, 2^e) sur l'application de la loi de Newton au thermomètre différentiel, les températures marquées par cet instrument sont proportionnelles aux quantités de