CHAPITRE XV

CHALEUR RAYONNANTE

PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT.

781. Définitions préliminaires. — Rayonnement et absorption de la chaleur. — 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, enlevée ou cédée au milieu ambiant. La chaleur se transmet donc d'un corps à un autre à travers l'espace. Cette propagation, qui se produit à toutes les distances et dans toutes les directions, se désigne sous le nom de rayonnement; et l'on nomme absorption l'inverse de la radiation, c'est-à-dire la pénétration de la chaleur rayonnante dans les corps.

Corps chauds et corps froids. — Les corps désignés vulgairement sous le nom de corps chauds ne sont pas les seuls qui émettent de la chaleur, ni les corps froids les seuls qui en absorbent. Tous les corps, chauds ou froids, émettent et absorbent constamment de la chaleur, seulement en quantités inégales.

Chaleur rayonnante ou radiation calorifique. — Lorsqu'on considère la chaleur se propageant par rayonnement, on l'appelle chaleur rayonnante ou radiation calorifique.

Rayon calorifique et faisceau calorifique. — Enfin, on définit rayon de chaleur ou rayon calorifique la ligne suivant laquelle la chaleur se propage, et faisceau un ensemble de rayons. Si ceux-ci s'écartent les uns des autres, le faisceau est divergent; s'ils sont parallèles, le faisceau est lui-même parallèle.

Chaleur lumineuse et chaleur obscure. — Dans l'étude de la chaleur rayonnante, il y a lieu de distinguer la chaleur ou radiation obscure et la chaleur ou radiation lumineuse: la première est émise par les corps non lumineux, tel qu'un vase rempli d'eau à 100°, et la seconde par les corps lumineux, comme le soleil ou les métaux incandescents.

782. Caractères physiques du rayonnement. — Le rayonnement

est un mode de propagation de la chaleur qui se distingue nettement de la conductibilité par les caractères suivants :

1° Le rayonnement a lieu dans toutes les directions autour des corps. — En effet, si l'on place un thermomètre en différents points autour d'un corps chaud, il subit partout une élévation de température.

2º Dans un milieu homogène, le rayonnement se fait en ligne droite. — En effet, si l'on interpose un petit écran sur la droite qui joint une source calorifique au réservoir d'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, changent de direction : on dit également qu'ils sont réfractés.

5° La chaleur rayonnante se propage dans le vide. — La présence d'un milieu pondérable ne paraît pas nécessaire au rayonnement de la chaleur. En effet, pour la chaleur lumineuse la propagation dans le vide se trouve démontrée par le rayonnement du soleil à travers les espaces planétaires, lesquels ne contiennent aucune matière pondérable. Quant à la propagation de la chaleur obscure dans le vide, on la constate par l'expérience de Rumford.

Expérience de Rumford. — Il prit un ballon de verre d'un demilitre de capacité, puis il souda d'abord dans la paroi un thermo-

mètre dont le réservoir occupait le centre (fig. 780), puis au col un long tube barométrique. Il remplit ensuite le ballon et le tube de mercure sec et, retournant l'appareil, il plongea le bout ouvert dans une cuvette pleine de mercure, exactement comme dans l'expérience de Torricelli. Le mercure s'abaissant à la hauteur moyenne de 76 centimètres, le vide se fit dans le ballon et dans une partie du tube. Alors celui-ci ayant été chauffé à la lampe, audessus du niveau du mercure, jusqu'à la fusion du verre, la pression extérieure déprima les tubes, qui se soudèrent et fermèrent hermétiquement les parois du ballon. Or, ce dernier étant ainsi complètement purgé d'air, dès qu'on l'exposait à une source de chaleur obscure, qu'on le plongeait, par exemple, dans de l'eau chaude, le thermomètre montait



Fig. 780.

presque instantanément. Donc la chaleur obscure se propage dans le vide, car le verre est trop mauvais conducteur pour que la propagation s'opère aussi rapidement par les parois du ballon et la tige du thermomètre. 4° Vitesse de propagation de la chaleur rayonnante. — La vitesse de propagation de la chaleur n'a pas été déterminée : on sait seulement qu'elle doit peu différer de celle de la lumière, si elle ne lui est pas rigoureusement égale.

5° Identité de la chaleur rayonnante et de la lumière. — Le caractère essentiel de la chaleur rayonnante, caractère qui résume tous les autres, c'est son identité avec la lumière, identité qui, non seulement est démontrée à priori par la théorie mécanique de la chaleur, mais qui est vérifiée expérimentalement par l'étude de toutes ses propriétés et des lois qui les régissent.

783. Intensité de la chaleur rayonnante. — Lois. — On définit l'intensité de la chaleur rayonnante comme celle de la lumière. On appelle intensité d'une source calorifique la quantité de chaleur qu'elle envoie normalement, à l'unité de distance, sur l'unité de surface du corps réchauffé.

Trois circonstances peuvent modifier la quantité de chaleur envoyée sur une surface déterminée par une source calorifique d'intensité constante. Ce sont : la distance de la source de chaleur, l'obliquité des rayons calorifiques par rapport à la surface qui les émet, et leur obliquité par rapport à la surface qui les reçoit.

1º Loi. — La quantité de chaleur rayonnée normalement sur

une surface déterminée varie en raison inverse du carré de la distance de cette surface à la source.

Cette loi peut se démontrer par le raisonnement et par l'expérience.

1° Démonstration théorique. — Soit une sphère creuse ab (fig. 781), 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 suppose que le rayon de la sphère devienne

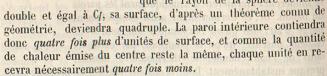
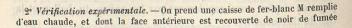
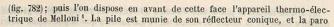


Fig. 781.





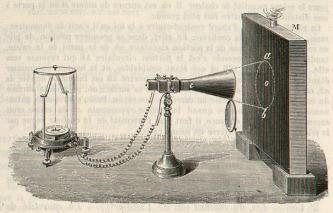


Fig. 782.

interne de celui-ci est recouverte de noir de fumée pour empêcher toute réflexion intérieure (792, II). La face de la pile étant d'abord placée à une petite

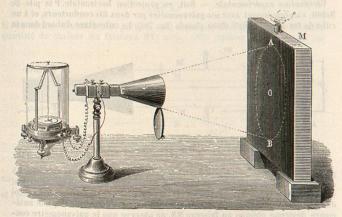


Fig. 785.

distance co, l'aiguille du galvanomètre est déviée, puis se fixe, par exemple à 80 degrés

1. On a vu ci-dessus (626) la description sommaire de l'appareil de Melloni; nous en décrirons les détails à mesure que nous en montrerons les usages.

Or, si l'on recule la pile à une distance CO double de co (fig. 785), le galvanomètre conserve la même déviation 80, ce qui montre que la pile reçoit toujours la même quantité de chaleur II en est encore de même si on la porte à une distance trois, quatre fois plus grande.

Ce résultat semble d'abord contradictoire à la loi qu'il s'agit de démontrer; mais, en réalité, il la confirme. En effet, dans sa première position, la pile ne reçoit de chaleur que de la portion circulaire ab de la paroi de la caisse, tandis que dans la seconde c'est la portion circulaire AB qui rayonne vers elle. Les deux cônes ACB et acb étant semblables, et la hauteur du premier étant double de la hauteur du second, le diamètre AB est lui-même double de ab, et, par suite, la surface AB quadruple de la surface ab, puisque la surface du cercle est proportionnelle au carré de son rayon. Donc, pour que le galvanomètre reste stationnaire quand la surface rayonnante de la caisse croît comme le carré de la distance, il faut que l'intensité de la chaleur reçue par la pile varie en raison inverse du même carré.

Remarque. — Il importe d'observer que cette loi ne s'applique qu'aux rayons calorifiques divergents; pour des rayons parallèles, l'intensité est la même à toutes les distances, abstraction faite de l'absorption par les milieux que la chaleur traverse.

2° Loi. — Loi du cosinus (ou de Lambert). — La quantité de chaleur émise obliquement par une surface rayonnante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons avec la normale à la surface.

Vérification expérimentale. — Soit, en projection horizontale, P la pile de Nobili, communiquant avec son galvanomètre par deux fils conducteurs, et A un cube de fer-blanc rempli d'eau chaude (fig. 784). Le cube étant d'abord dans la

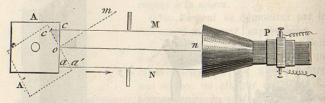


Fig. 784.

position A, telle que sa paroi antéricure soit perpendiculaire au faisceau MN qui tombe sur la pile, le galvanomètre marque une certaine déviation, 45 degrés par exemple : le rayonnement est du alors à la portion ac de la paroi du cube. Si l'on tourne celui-ci dans une position A', telle que sa paroi antérieure devienne oblique au faisceau MN, on observe que le galvanomètre continue à marquer 45. Or, la surface actuellement rayonnante a'c' étant plus grande que ac, si l'on représente par q la quantité de chaleur rayonnée dans le premier cas, et par q' la quantité rayonnée dans le second cas, puisque l'effet est le même dans les deux cas, ces quantités sont nécessairement en raison inverse des surfaces ac et a'c'; on a donc

$$q' \times \text{surf. } a'c' = q \times \text{surf. } ac.$$

PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT, 4001

Mais, la surface ac étant la projection de la surface ac, on a, d'après un théorème connu de trigonométrie,

surf.
$$ac = \text{surf. } a'c' \cos coc'$$
, ou surf. $ac = \text{surf. } a'c \cos mon$

(puisque les angles mon et coc' sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires). Portant la valeur de surface ac dans l'égalité [1], et supprimant le facteur commun, il vient $q' = q \cos mon$, égalité qui montre la loi.

REMARQUE. — Cette loi, découverte par le physicien Lambert, n'est pas générale: Desains a constaté qu'elle ne se vérifie que dans le cas très restreint des corps dénués de pouvoir réflecteur, comme le noir de fumée (792, II).

3° Lot. — La quantité de chaleur envoyée obliquement sur une surface déterminée par une source constante est proportionnelle au cosinus de l'angle que font les rayons incidents avec la normale à cette surface.

Vérification expérimentale. — Cette loi se démontre de la même manière que la précédente, dont elle est un corollaire. En effet, soit une source A d'intensité constante i (fig. 783) et soit d'abord ac la portion de surface qui reçoit normalement le faisceau calorifique incident. La quantité de chaleur q reçue par l'unité de surface ac sera égale à $\frac{i}{\text{surf}_{ac}}$. On aura donc

$$q = \frac{i}{\text{surf. } ac}$$

Si l'on incline la surface, la portion a'c', correspondante à ac, reçoit la même quantité de chaleur du faisceau MN; mais, cette chaleur étant répartie sur

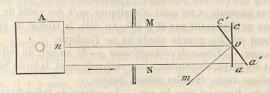


Fig. 785.

une surface plus grande, la quantité q' reçue par l'unité de surface, diminue et l'on a encore $q'=\frac{i}{\sup\{-g'e\}}$, d'où

$$q \times \text{surf.} \ a'c' = q' \times \text{surf.} \ ac,$$

d'où l'on déduit par le même calcul que ci-dessus

$$q' = q \cos mon$$

La vérification expérimentale consiste en ce que l'on obtient la même déviation dans les deux positions de la pile.

784. Vitesse de refroidissement : Loi de Newton. — Les conséquences nécessaires du rayonnement calorifique sont, d'une part, le réchauffement des corps extérieurs à la source, d'autre part le refroidissement de la source.

Un corps dans le vide ne se refroidit que par rayonnement. Dans l'atmosphère, il se refroidit en outre par suite de son contact avec l'air; dans les deux cas, on appelle vitesse moyenne de refroidissement l'abaissement de sa température pendant l'unité de

1º Refroidissement dans le vide. - Newton a énoncé sur le refroidissement des corps dans le vide la loi suivante : La vitesse moyenne de refroidissement d'un corps est proportionnelle à l'excès moyen de sa température sur celle de l'enceinte.

Si l'on appelle θ l'excès initial, θ' l'excès final, x le temps écoulé. m une constante, la loi de Newton s'exprime par l'équation

$$\frac{\theta - \theta'}{x} = m \left(\frac{\theta + \theta'}{2} \right).$$

Le coefficient constant m s'appelle la constante du refroidissement. Elle représente la vitesse de refroidissement qu'aurait le corps si son excès moyen était de 1°. On voit en effet que si $\frac{\theta+\theta'}{2}$ était égal à 1, le refroidissement par unité de temps, $\frac{\theta-\theta'}{x}$, deviendrait égal à m.

Dulong et Petit ont démontré expérimentalement que cette loi n'est pas générale et ne peut s'appliquer qu'à des excès de température ne dépassant pas 20 à 30°. Au delà, la vitesse de refroidissement est plus grande que la loi ne l'indique.

Remarque. — Vitesse de réchauffement. — Si, au lieu du refroidissement des corps, on considère leur réchauffement, la loi de Newton s'y applique aussi, dans les mêmes limites.

2º Refroidissement dans les gaz. — La vitesse de refroidissement dans les gaz est d'autant plus grande que la différence des températures du milieu ambiant et du corps chaud est plus considérable. Elle est plus grande dans les gaz que dans le vide, et varie avec la nature des gaz : elle est plus grande, par exemple, dans l'hydrogène que dans l'air. Enfin elle dépend encore du pouvoir émissif du corps chaud et de la pression de l'atmosphère ambiante.

785. Conséquences de la loi de Newton. — 1º 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 dans l'unité de temps est toujours la même, tandis que celle qu'il perd croit en même temps que l'excès de sa température sur celle de l'air ambiant. Il vient donc un moment où la quantité de chaleur absorbée est égale à celle qui est émise et la température du

corps qui se réchauffe reste alors stationnaire.

2º Théorie du thermomètre différentiel. - En appliquant la loi de Newton au thermomètre différentiel précédemment décrit (620) on démontre que ses indications sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'il reçoit. Soit, en effet, un thermomètre différentiel dont l'une des boules est exposée au rayonnement d'une source constante : l'instrument indique d'abord des températures croissantes, puis devient bientôt stationnaire. A ce moment, la quantité de chaleur que reçoit la boule chauffée est égale à celle qu'elle perd. Mais cette dernière, d'après la loi de Newton, est proportionnelle à la vitesse de refroidissement et par suite à l'excès de la température de la boule sur celle de l'enceinte; donc cet excès, qui est marqué par l'instrument, est proportionnel à la quantité de chaleur que reçoit la boule chauffée.

786. Équilibre mobile de température ou Hypothèse de Prévost. - Deux hypothèses ont été faites sur le rayonnement. On a supposé d'abord 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, et qu'il n'y a point de rayonnement inverse. Cet état durerait jusqu'à ce que la température du corps le plus chaud, en s'abaissant graduellement, devint la même que celle de l'autre corps, et alors tout rayonnement cesserait.

Cette hypothèse a été remplacée par la suivante, due à Prévost, de Genève. Tous les corps, quelle que soit leur température, émettent et reçoivent constamment de la chaleur 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 sont plus intenses 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 arrive ainsi un moment où la température est la même de part et d'autre; mais alors l'échange de chaleur entre les corps ne cesse pas, et comme chacun d'eux en reçoit autant qu'il en émet, la température reste partout constante. C'est cet état particulier qu'on désigne sous le nom d'équilibre mobile de température.