

procédé, qui a pris récemment des développements considérables, est désigné le plus ordinairement sous le nom de *phototypie* (*).

Nous signalerons enfin un procédé désigné sous le nom de *photo-gravure*, ou *gravure photographique*, qui permet d'obtenir une planche de cuivre servant à l'impression aux encres grasses, comme une planche gravée en taille-douce. — Ce procédé n'est qu'une modification de la photoglyptie, qui a été décrite plus haut. La feuille de gélatine bichromatée, après avoir été soumise sous le cliché à l'impression de la lumière, est encore traitée par l'eau chaude, de manière à y déterminer des creux et des reliefs (820); seulement, l'opération est conduite de manière à obtenir des creux peu profonds, et des reliefs présentant un *grain* semblable à celui de la gravure en taille-douce. Cette feuille est ensuite appliquée sur une lame de plomb, et passée avec elle au laminoir, de manière à y laisser son empreinte. Mais, comme le plomb n'offrirait pas une dureté suffisante pour résister à l'action de la presse qui doit servir au tirage, on en fait des moulages et contremoulages en cuivre, par la galvanoplastie : ce sont ces planches de cuivre qui servent au tirage à l'encre grasse. — On arrive à produire ainsi des gravures dont la finesse dépasse ce que pourrait réaliser l'artiste le plus habile, et qui ont l'avantage de reproduire le modèle avec une fidélité que la main de l'homme ne pourrait atteindre (**).

(*) On emploie encore dans l'industrie, sous le nom de *photo-lithographie*, un procédé un peu différent et qui consiste à impressionner par la lumière, sous un cliché, une couche d'albumine bichromatée, qui jouit de propriétés analogues à celles de la gélatine. Après divers traitements, dont le détail ne peut trouver place ici, la pierre peut servir au tirage à l'encre grasse, sans modification du procédé usuel.

(**) Dans certains autres procédés de gravure photographique, au lieu d'opérer par moulage, on fait usage de planches métalliques couvertes d'un enduit qui sera impressionné par la lumière, de manière à ne permettre ensuite la morsure aux acides qu'en certains points, à l'exclusion des autres. On obtient ainsi des gravures en creux ou en relief, sur plaques d'acier, de bronze, de cuivre ou de zinc, avec une rapidité et avec une économie supérieures à ce que donnerait la galvanoplastie.

APPENDICE AU LIVRE V

PROPAGATION DE LA CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

CHALEUR RAYONNANTE

I. — PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR RAYONNEMENT.

822. **Rayonnement et conductibilité.** — La chaleur peut se transmettre de deux manières différentes : tantôt elle se propage par *conductibilité*, c'est-à-dire en cheminant de proche en proche, dans des corps dont elle élève progressivement la température ; tantôt elle se propage par *rayonnement*, c'est-à-dire qu'elle franchit directement des espaces plus ou moins considérables, sans échauffer sensiblement les corps qu'elle rencontre.

Nous étudierons d'abord la propagation par rayonnement, qui offre, avec la propagation de la lumière, les analogies les plus intimes.

823. **La chaleur traverse le vide.** — La chaleur qui nous arrive du soleil, avec sa lumière, ne nous parvient qu'après avoir franchi les espaces célestes, où n'existe aucune matière pondérable : elle a donc traversé le *vide*.

La chaleur émise par des corps qui ne sont pas lumineux traverse également le vide. — Pour le démontrer, il suffit de répéter l'expérience suivante, qui est due à Rumford. Un thermomètre *t* (fig. 690) est soudé dans la paroi d'un ballon de verre, de manière que son réservoir B soit à peu près au centre du ballon. On a préalablement fait le vide dans le ballon : pour cela, on l'a soudé à l'extrémité d'un tube

d'environ 1 mètre de longueur, on a rempli tout l'appareil de mercure, de manière à faire du ballon la chambre d'un baromètre, comme le

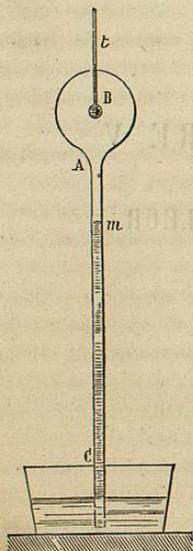


Fig. 690.

— Prévost, de Genève, a montré que la chaleur émise par un boulet rouge peut impressionner un thermomètre, placé de l'autre côté d'une nappe d'eau tombant d'un réservoir. — Avec une lentille taillée dans un bloc de glace, on a pu enflammer de la poudre, du papier, ou d'autres substances combustibles. — Dans ces expériences, il est impossible d'admettre que la chaleur s'est transmise en échauffant d'abord la nappe d'eau, ou la lentille de glace, qui étaient placées sur son trajet : elle les a évidemment traversées sans leur faire éprouver une élévation sensible de température.

825. Propagation rectiligne de la chaleur. — Rayons calorifiques. — La chaleur se transmet d'un point à un autre, comme la lumière, en suivant la *ligne droite* qui joint ces deux points. On peut le vérifier, au moins grossièrement, en plaçant le réservoir d'un thermomètre à une certaine distance d'une source calorifique, de dimensions assez petites pour qu'on puisse la supposer réduite à un point; si l'on interpose un petit écran de carton sur un point quelconque de la droite qui joint la source au réservoir du thermomètre, on n'observe plus aucune élévation de température.

Nous appellerons *rayon calorifique* toute direction rectiligne suivant laquelle se propage de la chaleur. — Un corps chaud émettant de la

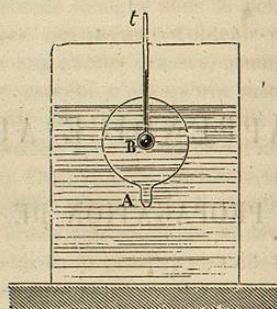


Fig. 691.

représente la figure 690; on a ensuite fermé à la lampe le col A du ballon, et on l'a détaché du tube. Quand on plonge le ballon, ainsi préparé, dans une cuve contenant de l'eau chaude (fig. 691), on voit le thermomètre accuser *instantanément* une élévation de température.

824. La chaleur traverse certains corps sans les échauffer d'une manière sensible.

chaleur dans *toutes les directions*, toute droite partant d'un point quelconque de ce corps doit être considérée comme représentant la direction d'un rayon calorifique.

826. Intensités calorifiques d'une même source à différentes distances. — Lorsque l'on considère des rayons calorifiques émanant d'un même point, on démontre, comme pour la lumière (697), qu'une même surface, placée successivement à diverses distances de la source, reçoit des quantités de chaleur *inversement proportionnelles aux carrés des distances*.

Nous appellerons *intensité propre* d'une source calorifique, la quantité de chaleur que reçoit de cette source, dans un temps déterminé, une surface égale à l'unité, placée à l'unité de distance.

Soit I l'intensité propre d'une source, ainsi définie. Si l'on considère une surface égale à l'unité, placée à une distance D de la source, elle recevra, dans le même temps, une quantité de chaleur dont la valeur sera $\frac{I}{D^2}$; cette quantité est ce qu'on nomme l'*intensité de la source à la distance D*.

827. Appareil de Melloni. — Les premières recherches précises sur la chaleur rayonnante ont été effectuées par Leslie, par Rumford et par Delaroche. Ces recherches ont été reprises et étendues par Melloni, à l'aide d'un appareil qui présente le double avantage de reposer sur des principes très simples et de fournir des mesures très précises. — Nous décrirons d'abord les diverses parties de cet appareil.

Les *sources de chaleur* que Melloni employait, pour les diverses expériences, étaient au nombre de quatre, savoir : — 1° Deux sources



Fig. 692.



Fig. 693.

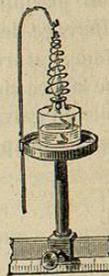


Fig. 694.

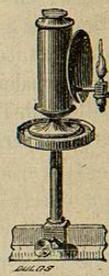


Fig. 695.

Sources de chaleur employées par Melloni.

de *chaleur obscure* : un cube rempli d'eau qu'on maintenait en ébullition au moyen d'une lampe à alcool (fig. 692); une plaque de cuivre, chauffée de même par une flamme d'alcool (fig. 693), et dont la température pouvait atteindre 400 degrés; — 2° deux sources de *chaleur lumineuse* : une spirale de platine, rendue incandescente par la flamme

d'une lampe à alcool (fig. 694) ; la flamme d'une petite lampe à huile, dite *lampe de Locatelli* (fig. 695), à mèche pleine, et sans cheminée de verre.

L'appareil de mesure, pour les quantités de chaleur, n'est autre que le thermo-multiplicateur décrit précédemment (525), lequel joue le rôle d'un thermomètre d'une extrême sensibilité. La pile thermo-électrique est installée sur un support, placé sur une règle divisée AB (fig. 696).

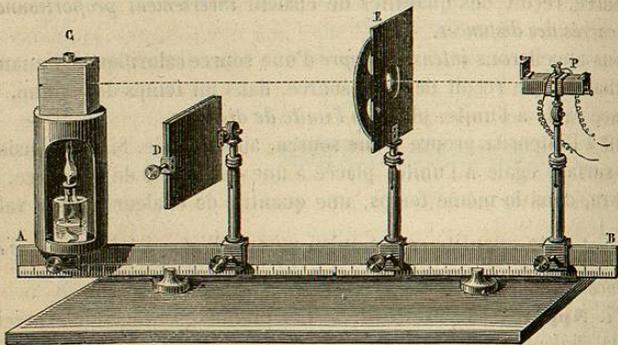


Fig. 696. — Appareil de Melloni.

D'autres supports servent à placer, sur cette même règle, soit les sources de chaleur nécessaires aux expériences, soit des écrans destinés à arrêter les rayons de chaleur qui devront être interceptés. — Le galvanomètre est supposé à droite de cette figure.

L'intensité du courant produit par la pile thermo-électrique étant proportionnelle à la différence de température de ses deux faces (547), et cette différence de température étant elle-même proportionnelle à la quantité de chaleur que la face chauffée reçoit de la source, on voit que les déviations de l'aiguille du galvanomètre permettront d'évaluer, dans les diverses expériences, les quantités de chaleur qui tomberont sur la pile (*).

II. — ÉMISSION.

828. **Émission de la chaleur rayonnante.** — La quantité de chaleur émise par un même corps augmente, en général, quand la température de ce corps s'élève. — Ainsi, par exemple, si l'on place la plaque de cuivre chauffée (fig. 695) à une certaine distance de la pile de

(*) Lorsque les déviations de l'aiguille dépassent 25 ou 50 degrés, on doit employer, comme le faisait Melloni, une *table de graduation*, construite pour l'appareil lui-même par une série d'expériences spéciales.

Melloni, en interposant entre elles un écran, on constate que, au moment où l'écran est supprimé, l'aiguille du galvanomètre est d'autant plus déviée que la température de la plaque était plus haute. — Nous n'avons pas d'ailleurs à insister sur ce point : l'expérience de chaque jour nous montre qu'un corps chauffé, comme un tuyau de poêle ou une barre de fer rougie, nous envoie, à distance, d'autant plus de chaleur que ce corps est plus chaud lui-même.

Mais la quantité de chaleur rayonnée par un corps dépend, en outre, de la nature de sa surface. C'est ce que montrent les expériences suivantes. — Plaçons, sur la règle AB de l'appareil de Melloni (fig. 696), le cube métallique C, dont les faces verticales auront été couvertes chacune d'une substance particulière : l'une, de noir de fumée ; une autre, de blanc de céruse ; une troisième sera métallique et brillante, etc. Un écran E, percé d'une ouverture, servira à limiter le faisceau de rayons qui doit arriver du cube à la pile. Un autre écran D servira, quand il sera relevé, à arrêter les rayons. — Supposons que, l'eau du cube étant en ébullition, on tourne d'abord vers la pile la face qui est enduite de noir de fumée. Dès que l'écran D est abaissé, comme l'indique la figure, on voit l'aiguille du galvanomètre se mettre en mouvement, et s'arrêter, après quelques oscillations, dans une position faisant un certain angle avec sa direction primitive. On relève alors l'écran D et on laisse l'aiguille revenir au zéro. — On tourne ensuite vers la pile une autre face du cube, une face métallique, par exemple, et on recommence l'expérience : on observe une nouvelle déviation de l'aiguille, beaucoup moindre que la première. — Avec une troisième face, on trouve encore une déviation différente, et ainsi de suite.

Or, dans ces expériences successives, les faces du cube sont toutes à la température de l'eau bouillante : de plus, ce sont toujours des surfaces d'égale étendue qui envoient leurs rayons à la pile. Ces expériences montrent donc que, à *égalité de température*, les quantités de chaleur émises dépendent de la nature de la surface rayonnante.

829. **Pouvoirs émissifs des divers corps.** — En répétant ces expériences pour les divers corps, on trouve que c'est toujours le *noir de fumée* qui, à une même température, émet la plus grande quantité de chaleur. — On est convenu de nommer *pouvoir émissif* d'un corps quelconque, le rapport de la quantité de chaleur qu'émet ce corps à celle qu'émet le noir de fumée, à la même température.

Le blanc de céruse paraît être à peu près le seul corps qui émette la même quantité de chaleur que le noir de fumée, à la même température ; c'est-à-dire que c'est le seul corps qui ait un pouvoir émissif égal à l'unité. — Pour tous les autres corps, les pouvoirs émissifs sont exprimés par des fractions, que l'on détermine par des expériences semblables à celles que nous venons de décrire. — C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres du tableau suivant :

POUVOIRS ÉMISSIFS

Noir de fumée.	1,00	Argent mat.	0,54
Blanc de céruse.	1,00	Platine laminé.	0,41
Colle de poisson.	0,91	Cuivre en feuilles.	0,55
Encre de Chine.	0,85	Or en feuilles.	0,04
Gomme laque.	0,72	Argent poli.	0,025

Les métaux ont, en général, comme on le voit, un pouvoir émissif assez faible, et d'autant plus faible que leur surface est mieux polie : le pouvoir émissif de l'argent poli est seulement 0,025. — Ainsi s'explique l'usage que l'on fait de vases d'argent poli, pour conserver les liquides qu'on veut maintenir chauds, comme le thé, le café, etc.

850. Refroidissement. — Loi de Newton. — Le refroidissement d'un corps placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne est toujours un phénomène complexe. La rapidité avec laquelle la température du corps s'abaisse dépend, non seulement de sa température primitive et de son pouvoir émissif, mais aussi de la température de l'enceinte, de la nature du gaz qu'elle contient, etc. Cependant, dans la plupart des cas, le refroidissement peut être considéré comme s'effectuant d'après la loi suivante, énoncée par Newton :

Pour un même corps, et lorsque l'excès de sa température sur celle de l'enceinte ne dépasse pas 20 ou 50°, les abaissements de température qui correspondent à des intervalles de temps égaux et très courts sont proportionnels aux excès moyens pendant ces intervalles ().*

(*) Cette loi conduit à une conséquence très simple, dont la vérification expérimentale peut être considérée comme une vérification de la loi elle-même.

Imaginons qu'un thermomètre ait été chauffé à une température qui surpasse de t degrés celle de l'enceinte où il est placé : et soient t', t'', \dots , les excès de sa température sur celle de l'enceinte au bout de 1, 2, 3, ..., minutes. Pendant la première minute, l'abaissement de température est de $t - t'$ degrés, et l'excès moyen est $\frac{t + t'}{2}$ degrés ; pendant la deuxième minute, l'abaissement est $t' - t''$, et

l'excès moyen est $\frac{t' + t''}{2}$; et ainsi de suite. Si la loi de Newton est exacte, il doit y avoir un rapport constant entre les abaissements de température et les excès moyens correspondants, c'est-à-dire qu'on doit avoir, en désignant par k un nombre constant :

$$t - t' = k \frac{t + t'}{2},$$

$$t' - t'' = k \frac{t' + t''}{2}, \text{ etc.}$$

De la première de ces équations, on déduit

$$t' = \frac{2 - k}{2 + k} t,$$

La seconde donne de même :

$$t'' = \frac{2 - k}{2 + k} t'$$

et ainsi de suite. — Les excès successifs t, t', t'', \dots doivent donc former une suite

I. — RÉFLEXION, TRANSMISSION ET ABSORPTION.

851. Réflexion de la chaleur rayonnante. — Lois de la réflexion. — Nous avons étudié jusqu'ici la chaleur rayonnante en ayant égard à la source qui la produit. Nous la suivrons maintenant dans les modifications qu'elle éprouve à la surface des corps qui s'opposent à son passage, et dans l'intérieur de ceux qu'elle traverse.

Lorsqu'un rayon calorifique rencontre une surface parfaitement polie, il éprouve une *réflexion*, semblable à celle de la lumière (702), et assujettie aux mêmes lois.

Pour le vérifier au moyen de l'appareil de Melloni, on installe verticalement une plaque métallique polie F sur un support (fig. 697), à la

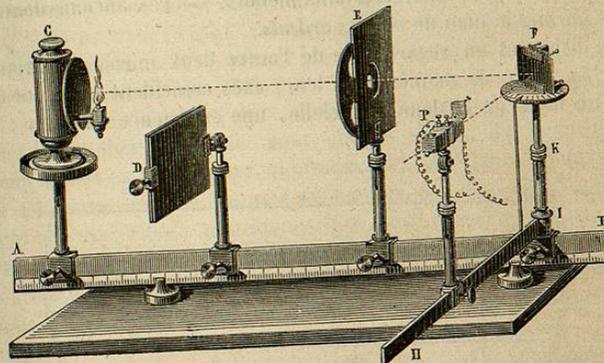


Fig. 697. — Vérification des lois de la réflexion de la chaleur.

même hauteur que la source de chaleur C et que l'ouverture de l'écran E qui laisse passer les rayons calorifiques. On place la pile P sur une règle supplémentaire III, mobile autour de la tige K : la partie supérieure du support présente, comme le montre la figure, un cercle divisé qui permet de mesurer l'angle que fait la normale au miroir, soit avec la règle principale IA, soit avec la règle mobile III. — Avant d'abaisser l'écran D, on amène la règle mobile dans une position telle que ces

de nombres tels que chacun d'eux soit égal au précédent multiplié par un facteur constant ; en d'autres termes, si la loi de Newton est exacte, les excès successifs de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte, à des instants croissant en progression arithmétique, doivent décroître en progression géométrique.

L'expérience confirme cette conséquence de la loi, tant que l'excès initial ne dépasse pas 20 ou 50 degrés. Dans ces limites, on doit donc considérer la loi comme exacte.

deux angles soient égaux. Aussitôt qu'on abaisse l'écran D, on constate que l'aiguille du galvanomètre est déviée; pour toute autre position de la pile, on n'obtient pas de déviation sensible. — Cette expérience montre donc que le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence, et que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

852. **Miroirs ardents.** — On obtient une nouvelle vérification de ces lois, en constatant que des rayons calorifiques, réfléchis par une surface courbe, se comportent comme les rayons lumineux.

On a vu (717) que, si l'on reçoit sur un miroir sphérique concave, parallèlement à son axe, un faisceau de rayons solaires, les rayons lumineux viennent converger; après réflexion, en un même point de l'axe, qui est le foyer principal (fig. 598 bis), de sorte qu'il y a, en ce point, concentration de lumière. Or, l'expérience montre que, au même point, se concentre aussi la chaleur émise par le soleil; on y peut enflammer de l'amadou, et, si les dimensions du miroir sont suffisamment grandes, on y peut fondre certains métaux. — Les anciens donnaient à ces miroirs le nom de *miroirs ardents*.

En disposant en regard l'un de l'autre deux miroirs sphériques A et B (fig. 698), de manière que leurs axes coïncident, on peut faire, avec un foyer de chaleur artificielle, une expérience analogue: c'est

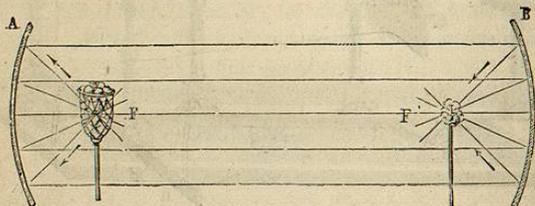


Fig. 698. — Miroirs conjugués.

l'expérience dite des *miroirs conjugués*. — Au foyer F, on place d'abord la flamme d'une bougie: les rayons lumineux qui viennent tomber sur le miroir A s'y réfléchissent et deviennent parallèles à l'axe commun; ils rencontrent alors le miroir B, se réfléchissent une seconde fois et vont se croiser au foyer F'; si, en ce point, on les reçoit sur un petit écran de papier blanc, ils y forment une image brillante de la flamme. Si l'on remplace l'écran par la boule d'un thermomètre sensible, on constate immédiatement une élévation de température.

Dans les Cours, on rend l'expérience plus frappante, en plaçant en F une corbeille métallique, remplie de charbons ardents; en F', de l'amadou ou du coton-poudre. On masque l'un des miroirs pendant qu'on dispose les charbons; à l'instant où l'on enlève l'écran, l'amadou prend feu, même à plusieurs mètres de distance

853. **Pouvoirs réflecteurs des divers corps.** — Quelque polie que soit une surface, elle ne réfléchit jamais intégralement toute la chaleur qu'elle reçoit. — On appelle *pouvoir réflecteur* d'une surface déterminée, le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.

L'appareil de Melloni permet de mesurer les pouvoirs réflecteurs de plaques polies de différentes natures, en plaçant successivement en F (fig. 697) ces diverses plaques. On mesure d'abord la quantité de chaleur incidente, en plaçant la pile sur le trajet des rayons qui viennent directement de la source; puis la quantité de chaleur réfléchie, en précédant, comme nous l'avons indiqué (851). — C'est ainsi que MM. de la Provostaye et P. Desains ont obtenu les résultats suivants:

POUVOIRS RÉFLECTEURS

Argent	0.96	Acier	0.85
Or	0.95	Platine	0.85
Cuivre	0.95	Zinc	0.81
Laiton	0.95	Fer	0.77
Métal des miroirs	0.83	Fonte	0.75

On peut étudier de même, pour chaque plaque, les quantités de chaleur réfléchies *sous diverses incidences*. — L'expérience montre que, pour les corps *opaques*, comme les métaux, les pouvoirs réflecteurs varient peu avec l'angle d'incidence. Les corps *transparents*, comme le verre, le cristal de roche, etc., réfléchissent une proportion d'autant plus grande de la chaleur incidente, que l'angle d'incidence est plus grand. — Ce résultat est analogue à celui que présente la réflexion de la lumière (710).

854. **Réflexion irrégulière ou diffusion.** — Les substances mates, telles que le blanc de céruse, les métaux dépolis, lorsqu'ils reçoivent de la chaleur dans une direction déterminée, ne la réfléchissent pas dans une direction unique: ils en renvoient une partie dans toutes les directions. Ce résultat, qui est encore analogue à celui que nous avons constaté pour la lumière (711), constitue la *réflexion irrégulière* ou la *diffusion* de la chaleur.

Ainsi, en remplaçant la plaque métallique F (fig. 697) par une plaque couverte de blanc de céruse, on constate que la pile accuse une certaine quantité de chaleur reçue, quelle que soit la direction que l'on donne à la règle III qui la supporte.

855. **Transmission de la chaleur rayonnante.** — **Corps diathermanes et corps athermanes.** — Nous avons constaté (824) que la chaleur peut traverser certains corps, comme la lumière traverse les corps transparents. — On désigne ces corps sous le nom de *corps diathermanes*, c'est-à-dire transparents pour la chaleur. Par opposition,

*La solution de alunbre en
agua deya pasar los rayos*