CHAPITRE XVI

CHALEUR RAYONNANTE (SUITE).

—

RÉFLEXION ET DIFFUSION. — POUVOIRS RÉFLECTEUR ET DIFFUSIF. POUVOIRS ABSORBANT ET ÉMISSIF.

787. **Réflexion de la chaleur rayonnante. — Lois.** — Lorsque des rayons calorifiques tombent à la surface d'un corps, ils se partagent généralement en deux portions : les uns pénètrent dans la masse du corps, les autres se relèvent comme repoussés par la surface, à la manière d'une bille élastique; on dit que ces derniers sont *réfléchis*.

La réflexion de la chaleur rayonnante est soumise aux mêmes lois que la réflexion de la lumière :

1° *Le rayon incident* SI *et le rayon réfléchi* IR (fig. 786) *sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.*

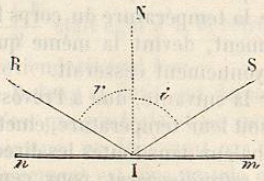

Fig. 786.

2° *L'angle de réflexion* RIN *est égal à l'angle d'incidence* SIN.

Vérification expérimentale. — Ces lois se démontrent soit directement à l'aide du *thermomultiplicateur* de Melloni, soit indirectement par toutes les conséquences géométriques qu'on en déduit, entre autres par l'expérience des *miroirs ardents* (788).

1° *Expérience de Melloni.* — *Appareil.* — Sur une règle horizontale métallique MN (fig. 787), d'un mètre de longueur et divisée en millimètres, sont fixées différentes pièces à l'aide de vis de pression. C'est ce qu'on peut appeler le *banc de chaleur rayonnante*, par analogie avec le *banc d'optique*. En S est une source de chaleur, qui est soit un cube de laiton plein d'eau à 100°, appelé *cube de Leslie*, soit un fil de platine chauffé à blanc dans la flamme d'une lampe à alcool, appelé *platine incandescent*. En K, un écran plein intercepte, quand il est relevé, les rayons de chaleur venant de la source; en F, un deuxième écran, percé en son centre, est destiné à laisser passer un faisceau parallèle. A l'autre extrémité

de la règle est une tige I, qui soutient un limbe gradué dont le zéro correspond à la direction de la règle MN, et, par suite, du faisceau S*m*. Le limbe est percé à son centre d'un trou dans lequel tourne un axe qui porte un miroir métallique plan *m*. Autour de la tige I tourne librement une alidade L, sur laquelle est fixée la

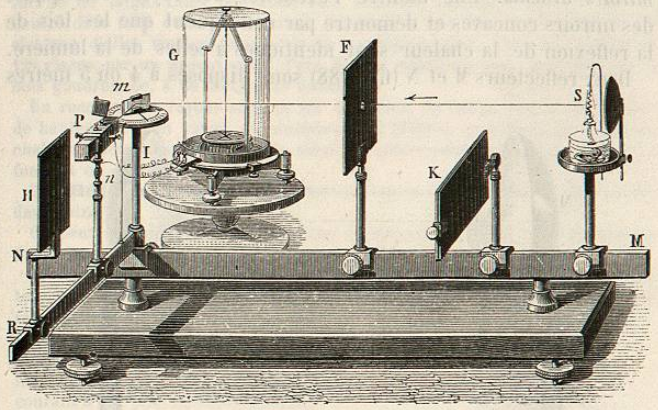

Fig. 787.

pile thermo-électrique P en communication avec son galvanomètre G. Entre la pile et le limbe gradué est une tige *n*, recourbée, à son extrémité, vers le bord du limbe gradué, pour marquer sur celui-ci les déplacements angulaires de l'alidade. Enfin, un écran coudé H[1], porté par l'alidade, se place entre la source de chaleur et la pile, afin que celle-ci ne reçoive que la chaleur réfléchie par le miroir.

Expérience. — On commence par abaisser l'écran K. Un faisceau de chaleur passe par le trou de l'écran F, tombe sur le miroir *m* et s'y réfléchit. Si l'alidade n'est pas dans la direction du faisceau réfléchi, celui-ci ne rencontre pas la pile, et le galvanomètre reste au zéro; mais si l'on tourne lentement l'alidade, on trouve une position *où le galvanomètre marque une déviation maximum*, ce qui a lieu quand la pile reçoit en plein le faisceau réfléchi. Or, si l'on note alors la position, sur le limbe gradué, d'une petite aiguille qui est parallèle à la normale au point d'incidence, on observe qu'*elle partage en deux parties égales l'angle formé par le faisceau incident et le faisceau réfléchi*, ce qui démontre la première loi.

La seconde loi est démontrée par la même expérience; car les pièces de l'appareil sont disposées de manière que les rayons incidents et réfléchis

1. Dans le dessin, pour ne pas masquer la pile, on n'a pas mis l'écran à la place qu'il doit occuper.

soient dans un même plan qui est horizontal et, par suite, perpendiculaire à la face verticale du miroir.

2° *Expérience des miroirs ardents.* — Cette expérience fut faite pour la première fois, à Genève, par Pictet et Saussure; elle est connue sous le nom d'*expérience des miroirs conjugués* ou des *miroirs ardents*. Elle montre l'existence des foyers *calorifiques* des miroirs concaves et démontre par conséquent que les lois de la réflexion de la chaleur sont identiques à celles de la lumière.

Deux réflecteurs M et N (fig. 788) sont disposés à 4 ou 5 mètres

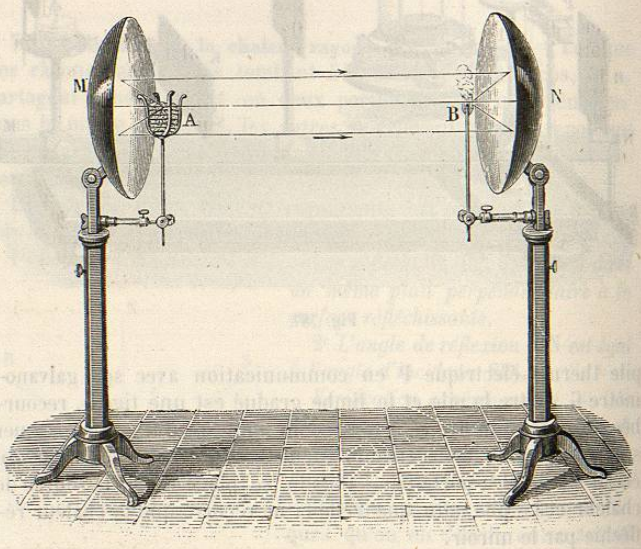

Fig. 788.

de distance, de manière que leurs axes coïncident. Au foyer de l'un, dans un petit panier de fil de fer A, on place des charbons incandescents; au foyer de l'autre, 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. Ayant pris, par l'effet de cette réflexion, une direction parallèle à l'axe, ils 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 et au delà du foyer il ne s'enflamme pas.

788. **Miroirs ardents.** — En raison de la haute température qu'on peut obtenir aux foyers des miroirs concaves, on leur a donné le nom de *miroirs ardents*. On rapporte qu'Archimède incendia les vaisseaux romains devant Syracuse au moyen de semblables miroirs.

Buffon construisit des miroirs ardents dont la puissance prouvait la possibilité du fait attribué à Archimède. Ces miroirs étaient formés de l'assemblage 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 d'elles vinssent concourir en un même point. Avec un système de 128 glaces, par un ardent soleil d'été, Buffon enflamma ainsi une planche de bois goudronnée, à 68 mètres de distance.

En recevant les rayons solaires sur un miroir de laiton écroui, de 1 mètre de hauteur et d'un rayon de courbure de 2 mètres, on obtient au foyer une chaleur tellement intense, que la silice, la pierre ponce, le cuivre, l'argent, y fondent en quelques minutes.

789. **Réflexion dans le vide.** — La chaleur se réfléchit dans le vide comme dans l'air.

On peut démontrer ce fait par une expérience analogue à la précédente, due à Davy.

Sous le récipient de la machine pneumatique, on dispose deux petits réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 789). Au foyer de l'un est un thermomètre très sensible, 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. Le vide étant fait, le thermomètre monte de plusieurs degrés aussitôt que le courant passe, phénomène qui est bien dû à la chaleur réfléchie, car le thermomètre n'accuse plus la même élévation de température s'il n'est pas exactement au foyer du second réflecteur.

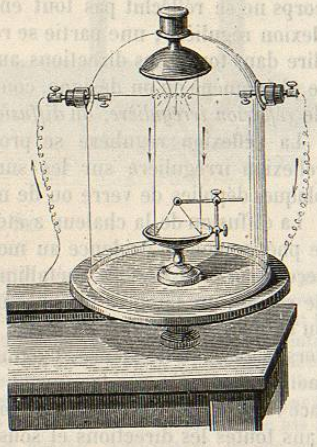

Fig. 789.

790. **Réflexion apparente du froid.** — Si l'on dispose deux réflecteurs en regard l'un de l'autre (fig. 788), et qu'au lieu de charbons incandescents on place au foyer du miroir M une masse de glace ou un mélange réfrigérant, l'air ambiant étant à 12 ou 15°, un thermomètre différentiel placé au foyer de l'autre réflecteur s'abaisse de plusieurs degrés au-dessous de cette température.

Ce phénomène était attribué jadis à des rayons frigorifiques émis par la glace et réfléchis par les miroirs. Mais cette *réflexion apparente du froid*, comme on l'appelait, s'explique naturellement par l'hypothèse de l'équilibre mobile de température En effet,

dans cette expérience, comme dans celle de l'inflammation de l'amadou, le miroir devant lequel est la masse de glace se substitue à une portion de l'enceinte. Par suite, les rayons de chaleur que celle-ci envoie vers le thermomètre sont interceptés par le miroir et remplacés par ceux qui, partis de la glace, tombent sur le premier miroir, s'y réfléchissent vers le second, et de là tombent enfin sur la boule du thermomètre. Or ces rayons ne compensent pas l'effet des rayons interceptés par le miroir, car leur température est plus basse; de là le refroidissement marqué par le thermomètre.

C'est ainsi qu'il faut expliquer le froid qu'on ressent près des murailles de plâtre, de pierre, et de toute masse dont la température est inférieure à celle de notre corps.

791. **Réflexion irrégulière**, ou **Diffusion de la chaleur rayonnante.** — Dans les expériences précédentes où la chaleur se réfléchit sur une surface bien polie, on a admis que la réflexion ne se produit que dans une seule direction : c'est la *réflexion régulière*, ou *réflexion spéculaire*. Or la chaleur qui tombe à la surface d'un corps ne se réfléchit pas tout entière suivant les lois de la réflexion régulière; une partie se réfléchit irrégulièrement, c'est-à-dire dans toutes les directions autour du point d'incidence : c'est le phénomène qu'on désigne, comme pour la lumière, sous le nom de *réflexion irrégulière*, ou *diffusion*.

La réflexion régulière se produit sur les surfaces polies; la réflexion irrégulière sur les surfaces rugueuses, telles que les plaques dépolies de verre ou de métal.

La diffusion de la chaleur a été découverte par Melloni. On met le phénomène en évidence au moyen du thermomultiplicateur. On reçoit, sur une surface métallique mate ou recouverte de blanc de céruse, un faisceau de chaleur; or, sous quelque inclinaison ou de quelque côté qu'on dirige la pile du thermomultiplicateur vers le point d'incidence, l'aiguille du galvanomètre est plus ou moins déviée dès que les rayons calorifiques rencontrent la surface réfléchissante : ce qui fait voir qu'il y a de la chaleur réfléchie dans toutes les directions et sous toutes les inclinaisons.

792. **Pouvoir réflecteur.** — I. *Définitions.* — Le *pouvoir réflecteur* d'une substance est sa propriété de réfléchir une proportion plus ou moins grande de la chaleur incidente.

On *mesure* le pouvoir réflecteur par *le rapport de la quantité de chaleur réfléchie à la quantité de chaleur incidente.* C'est à ce rapport qu'on donne le plus souvent le nom de *pouvoir réflecteur*.

II. *Détermination expérimentale.* — 1° *Expériences de Leslie.* — Leslie appelait *pouvoir réfléchissant* le rapport entre la quantité de chaleur réfléchie par

un corps et celle que réfléchit un autre corps type, lequel était ordinairement le cuivre jaune poli.

Afin d'étudier ce pouvoir pour diverses substances sans construire de réflecteur avec chacune d'elles, Leslie disposa ses expériences comme le montre la figure 790.

Appareil et *mesure.* — La source de chaleur est un cube M rempli d'eau à

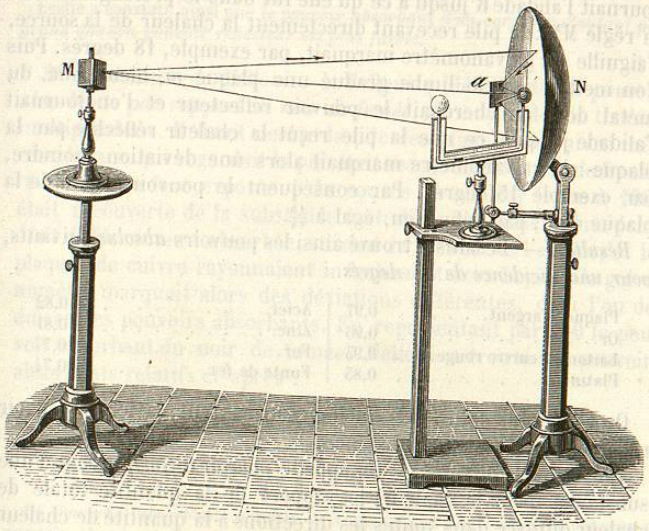

Fig. 790.

100°. Sur l'axe d'un réflecteur N, entre le foyer et le miroir, est fixée une plaque *a* de la substance dont on cherche le pouvoir réfléchissant. 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 thermomètre différentiel. Or, le réflecteur et le thermoscope restant les mêmes, et l'eau du cube étant toujours à 100°, on observe que la température accusée par le thermomètre varie avec la nature des plaques *a*. De là on déduit, non pas *le pouvoir réflecteur* d'un corps, mais *le pouvoir réfléchissant*, tel que nous l'avons défini plus haut.

Résultats. — En représentant par 100 le pouvoir du cuivre jaune, pris pour terme de comparaison, Leslie a formé le tableau suivant des *pouvoirs réfléchissants* de certaines substances.

Cuivre jaune poli	100	Encre de Chine	15
Argent	90	Étain amalgamé	10
Étain plané	80	Verre	10
Acier	70	Verre huilé	5
Plomb	60	Noir de fumée	0

2° *Expériences de Melloni.* — Melloni le premier a déterminé, à l'aide du thermomultiplicateur, le *pouvoir réflecteur absolu* (tel que nous l'avons défini ci-dessus) d'un certain nombre de substances. Desains a repris ces mesures en perfectionnant les procédés.

3° *Expériences de Paul Desains.* — L'appareil était disposé comme l'indique la figure 787. Après avoir enlevé la plaque *m*, on tournait l'alidade R jusqu'à ce qu'elle fût dans le prolongement de la règle MN : la pile recevant directement la chaleur de la source, l'aiguille du galvanomètre marquait, par exemple, 18 degrés. Puis l'on mettait sur le limbe gradué une plaque *m*, bien polie, du métal dont on cherchait le pouvoir réflecteur et l'on tournait l'alidade jusqu'à ce que la pile reçût la chaleur réfléchie par la plaque : le galvanomètre marquait alors une déviation moindre, par exemple 15 degrés. Par conséquent le pouvoir absolu de la plaque était, par définition, égal à $\frac{15}{18}$.

Résultats. — Desains a trouvé ainsi les pouvoirs *absolus* suivants, *pour une incidence de* 30 *degrés.*

Plaqué d'argent	0,97	Acier	0,82
Or	0,95	Zinc	0,81
Laiton et cuivre rouge	0,93	Fer	0,77
Platine	0,83	Fonte de fer	0,74

On verra plus loin (797) quelles causes font varier le pouvoir réflecteur d'une même substance.

793. **Pouvoir diffusif.** — On appelle *pouvoir diffusif absolu* d'une substance (pour la chaleur) le rapport de la quantité totale de chaleur diffusée dans toutes les directions à la quantité de chaleur incidente.

Le pouvoir diffusif dépend de la *source de chaleur* et de la *surface réfléchissante.* Avec le noir de fumée, les métaux et le verre polis, il est très faible et peut être négligé. Avec les métaux mats, le verre dépoli, le papier, le blanc de céruse, le pouvoir diffusif est plus ou moins grand, suivant la source de chaleur.

794. **Pouvoir absorbant.** — I. *Définitions.* — Les corps ont la propriété de laisser pénétrer dans leur masse une portion plus ou moins grande de la chaleur incidente : on exprime cette propriété en disant qu'ils possèdent un *pouvoir absorbant* pour la chaleur. On mesure soit les pouvoirs absorbants *absolus*, soit les pouvoirs absorbants *relatifs.*

Le *pouvoir absorbant relatif* est le rapport de la quantité de chaleur absorbée par un corps à celle qu'absorberait, dans les mêmes conditions, un autre corps, pris pour terme de comparaison. Le *pouvoir absorbant absolu* serait le rapport de la chaleur absorbée à la chaleur incidente.

II. *Détermination des pouvoirs absorbants relatifs.* — 1° *Expériences de Leslie.* — Il déterminait les *pouvoirs absorbants relatifs* à l'aide de l'appareil déjà employé pour les pouvoirs réflecteurs (fig. 790). Il supprimait la plaque *a* et plaçait la boule du thermomètre différentiel au foyer même du réflecteur Cette boule était successivement recouverte de noir de fumée, de vernis, de feuilles d'or, d'argent, de cuivre, etc. Le thermomètre montait, sous l'influence de la source M, à des températures d'autant plus élevées que l'enduit de la boule absorbait plus de chaleur.

Leslie a constaté ainsi que *le pouvoir absorbant d'un corps est d'autant plus grand que son pouvoir réflecteur est plus faible.*

2° *Expériences de Melloni.* — Melloni a déterminé les *pouvoirs absorbants par rapport au noir de fumée,* au moyen de son thermomultiplicateur. Il fixait devant la pile des plaques de cuivre minces : la face qui regardait la pile était recouverte de noir de fumée, tandis que la face exposée à la source de chaleur (cube à 100°) était recouverte de la substance à étudier. La chaleur incidente était différemment absorbée, suivant la nature de l'enduit, et les plaques de cuivre rayonnaient inégalement vers la pile; le galvanomètre marquait alors des déviations différentes, d'où l'on déduisait les pouvoirs absorbants. En représentant par 100 le pouvoir absorbant du noir de fumée, Melloni a trouvé les pouvoirs absorbants relatifs ci-après :

Noir de fumée	100	Encre de Chine	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque	72
Colle de poisson	91	Métaux	13

III. *Pouvoirs absorbants absolus.* — Toutes ces expériences prouvent que le pouvoir absorbant d'un corps varie toujours en sens inverse de son pouvoir réflecteur, c'est-à-dire que plus un corps réfléchit la chaleur, moins il l'absorbe, et réciproquement. Mais les deux pouvoirs ne sont pas complémentaires, c'est-à-dire que la somme des quantités de chaleur réfléchie et absorbée ne représente pas la totalité de la chaleur incidente : elle est toujour moindre. Cela tient à ce que la chaleur incidente se divise réellement en trois portions : 1° l'une qui est absorbée et échauffe le corps; 2° une autre qui est réfléchie régulièrement, c'est-à-dire suivant les lois démontrées précédemment (787); 3° une troisième qui est réfléchie irrégulièrement (791). De plus, pour un certain nombre de corps, il y a à considérer une quatrième portion qui les traverse sans les échauffer (799).

Représentons par l'unité l'intensité du faisceau calorifique incident, par a le pouvoir absorbant absolu d'un corps, par r son pouvoir réflecteur absolu, par d son pouvoir diffusif absolu (791) ; on a évidemment pour les corps qui ne se laissent pas traverser par la chaleur, $a + r + d = 1$ [1].

Pour les métaux polis, dont le pouvoir diffusif est très faible, l'égalité ci-dessus se réduit à $a = 1 - r$ [2].

Pour les substances comme les métaux mats, le papier, dont le pouvoir réfléchissant est très petit, elle devient $a = 1 - d$ [3].

Enfin, quand le pouvoir réfléchissant et le pouvoir diffusif sont en même temps négligeables, on a sensiblement $a = 1$; c'est ce qui a lieu pour le noir de fumée.

795. **Pouvoir émissif.** — I. *Définitions.* — Le *pouvoir émissif* des corps est leur propriété d'émettre, à température et à surface égales, des quantités de chaleur plus ou moins grandes. On ne considère que les *pouvoirs émissifs relatifs :* on appelle *pouvoir émissif relatif* d'une substance le rapport qui existe entre la quantité de chaleur qu'elle émet dans certaines conditions de température, de surface et de milieu, à la quantité de chaleur qu'émettrait, dans les mêmes conditions, une autre substance prise pour type de comparaison.

La substance-type, universellement adoptée, est le *noir de fumée.*

II. *Détermination des pouvoirs émissifs.* — 1° *Expériences de Leslie.* — C'est toujours avec le même appareil que Leslie a déterminé le pouvoir émissif des corps. La boule du thermomètre différentiel était placée au foyer même du réflecteur, et les faces du cube M étaient formées de métaux différents ou recouvertes de diverses substances, noir de fumée, papier, etc. Le cube étant plein d'eau à 100°, et les autres conditions restant les mêmes, Leslie tournait successivement vers le réflecteur chaque face du cube, et notait les températures stationnaires du thermomètre. Pour la face recouverte de noir de fumée, la température s'élevait plus que pour les autres, et c'étaient les faces métalliques qui donnaient les plus faibles températures. En appliquant ici la loi de Newton, il calculait aisément les pouvoirs émissifs des différentes substances *relatifs* au noir de fumée. En représentant par 100 celui du noir de fumée, Leslie a formé le tableau suivant :

Noir de fumée	100	Colle de poisson	80
Céruse	100	Plomb terne	45
Papier	98	Mercure	20
Cire à cacheter	95	Plomb décapé	19
Verre blanc ordinaire	90	Fer poli	15
Encre de Chine	88	Étain, or, argent, cuivre	12

Remarque. — Il est à remarquer dans ce tableau que *l'ordre des corps est précisement l'inverse de celui du tableau des pouvoirs réflecteurs.*

2° *Expériences de Melloni.* — Melloni a déterminé les pouvoirs émissifs en prenant également pour source de chaleur un cube plein d'eau à 100° : l'une des faces était recouverte de noir de fumée, et les autres de différentes substances. Il dirigeait successivement sur la pile les rayons émis par ces différentes faces (fig. 791) et notait les déviations correspondantes du galvanomètre. De la comparaison de ces nombres il a déduit les pouvoirs émissifs suivant :

Noir de fumée	100	Encre de Chine	85
Blanc de céruse	100	Gomme laque	72
Colle de poisson	91	Surfaces métalliques	12

3° *Expériences de Desains.* — Paul Desains, qui a repris ces

expériences en se servant du thermomultiplicateur, a trouvé les nombres suivants pour les métaux, le pouvoir du noir de fumée étant représenté par 100.

Platine laminé	10,80	Or en feuilles	4,28
— bruni	9,50	Argent vierge laminé	3,00
Argent mat déposé chimiquement	5,36	— pur bruni	2,50
Cuivre en lames	4,95	— déposé chimiquement et bruni	2,25

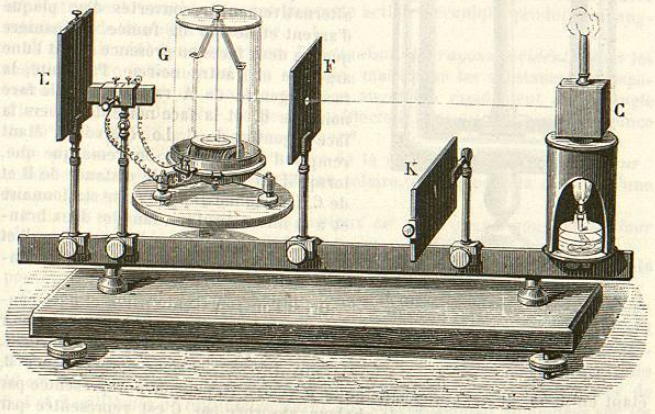

Fig. 791.

On voit, d'après ce dernier tableau, que les nombres trouvés par Leslie et par Melloni pour les métaux paraissent être trop grands.

796. **Comparaison des pouvoirs absorbants et des pouvoirs émissifs.** — 1° *Loi de Leslie.* — Leslie avait conclu de ses expériences que *le pouvoir émissif d'un corps*, relatif au noir de fumée, *est toujours égal à son pouvoir absorbant relatif*, c'est-à-dire que, si une substance émet 2 fois, 3 fois plus de chaleur que le noir de fumée, elle en absorbe aussi 2 fois, 3 fois davantage.

2° *Expériences de Kirchhoff.* — Cette loi a été longtemps admise comme générale; mais Kirchhoff a trouvé que les pouvoirs émissif et absorbant d'une même substance ne varient pas dans le même rapport quand la température s'élève ou quand la source de chaleur change. La loi de Leslie parait donc soumise aux deux restrictions suivantes :

1° Lorsqu'on compare le pouvoir émissif d'un corps à son pouvoir absorbant la température doit être sensiblement la même.

2° La chaleur absorbée et la chaleur émise doivent être de même nature (toutes deux obscures ou toutes deux lumineuses).