parfaitement diathermanes; mais M. Tyndall a trouvé que, tandis que l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, ont un pouvoir diathermane *si faible, qu'ils n'absorbent qu'une quantité à peine appréciable de la chaleur qui les traverse,* les gaz composés, comme l'acide sulfureux, le gaz ammoniac, le gaz oléfiant, arrêtent presque complètement la chaleur, même lorsque leur tension n'est que de quelques centimètres de mercure.

Diathermanéité de l'air. — M. Tyndall, ayant expérimenté sur de l'air humide, trouva qu'il absorbe 70 fois plus de chaleur que l'air sec; d'où il avait conclu naturellement que l'air humide a un pouvoir absorbant plus grand que l'air sec. D'autre part, Magnus trouvait que ces pouvoirs sont sensiblement égaux, et qu'on n'observe de différence entre eux que lorsque l'air contient l'eau à l'état de vapeur vésiculaire, analogue à celle qui constitue les nuages. Enfin M. Wild découvrit que c'est la paroi du tube où est renfermé l'air humide qui est cause de la discordance entre ces résultats. Si la surface interne de cette paroi est polie, l'air humide absorbe plus que l'air sec; si, au contraire, elle est noircie ou recouverte de velours, l'air humide absorbe moins. C'est donc *à la vapeur condensée sur les parois du tube* qu'est due la différence des résultats cités plus haut.

802. **Applications des pouvoirs diathermanes.** — 1° C'est grâce à leur grand pouvoir diathermane que les couches supérieures de l'atmosphère sont toujours à une basse température, malgré les rayons solaires qui les traversent.

2° L'eau étant peu diathermane, le phénomène inverse se produit au sein des mers et des lacs : les couches supérieures participent aux variations de température, suivant les saisons, tandis qu'à une certaine profondeur la température reste constante.

3° Les propriétés des corps diathermanes ont été utilisées pour séparer la lumière et la chaleur qui rayonnent ensemble d'une même source. Le sel gemme, recouvert de noir de fumée, arrête complètement la lumière et laisse passer la chaleur obscure. Au contraire, des lames ou des dissolutions d'alun arrêtent la chaleur tout en étant parfaitement transparentes. On s'en sert avec avantage dans les éclairages à la lumière électrique ou solaire, lorsqu'il est nécessaire d'éviter une chaleur trop intense. L'iode dissous dans le bisulfure de carbone produit l'effet inverse : il absorbe les rayons lumineux, et laisse passer la chaleur obscure.

L'usage des cloches en verre dont on abrite dans les jardins certaines plantes, et l'emploi des serres froides ou chaudes sont fondés sur la diathermanéité du verre. On a vu dans le tableau ci-dessus (800) que cette substance (qui est *diathermane* pour la chaleur lumineuse des rayons solaires) est absolument *athermane* pour la chaleur obscure qui rayonne du sol.

803. **Analyse des radiations calorifiques. — Thermochrose.** — Les propriétés que présente la chaleur dans son passage au travers des corps ont conduit Melloni à étendre à la chaleur l'hypothèse faite depuis longtemps sur la lumière. De même que Newton avait démontré l'existence de plusieurs

espèces de lumière, le *rouge*, l'*orangé*, le *jaune*, le *vert*, le *bleu*, l'*indigo* et le *violet*, qui ne se transmettent pas également au travers des corps diaphanes et qui peuvent être réunies entre elles ou séparées, de même Melloni démontra l'existence de plusieurs espèces de rayons calorifiques (797) émis simultanément, en proportions variables, par les diverses sources de chaleur, et doués de la propriété de traverser plus ou moins facilement les substances diathermanes. Celles-ci possèdent donc une véritable *coloration* calorifique, c'est-à-dire qu'elles absorbent certains rayons de chaleur et laissent passer les autres, de la même manière qu'un verre bleu, par exemple, est traversé par la lumière bleue, et ne l'est pas par les autres couleurs. Melloni a donné le nom de *thermochrose* à cette espèce de *coloration calorifique* des corps diathermanes.

804. **Analogies entre la lumière et la chaleur.** — Le spectre calorifique qui accompagne le spectre lumineux (797) prouve une grande similitude entre la radiation calorifique et la radiation lumineuse. Cependant, Melloni ayant fait voir que certaines substances, comme le quartz, la glace pure, qui laissent très bien passer la lumière, sont peu perméables à la chaleur de certaines sources, et que le quartz enfumé, qui est fort peu transparent, est au contraire très diathermane, il semble y avoir là un caractère distinctif entre la chaleur et la lumière; mais cette différence disparaît quand on fait la distinction de la chaleur obscure et de la chaleur lumineuse.

En effet, en considérant d'abord la chaleur lumineuse, c'est-à-dire celle qui se trouve dans la partie visible du spectre, et en expérimentant successivement sur les sept faisceaux du spectre d'un prisme de sel gemme, MM. Jamin et Masson ont trouvé que les substances parfaitement transparentes, comme le sel gemme, le verre, l'alun, sont aussi parfaitement diathermanes, abstraction faite des pertes dues à la réflexion. De plus, en faisant passer les différents faisceaux du spectre à travers des plaques de verre vert, bleu et violet, ils ont constaté que, dans la partie lumineuse du spectre, *la chaleur et la lumière se transmettent toujours dans les mêmes proportions à travers un milieu quelconque.*

Les résultats ne sont plus les mêmes avec la chaleur obscure, c'est-à-dire avec les rayons infra-rouges, émis par le cuivre à 400°, ou par le cube à 100° (795). En effet, tandis que le sel gemme laisse passer également tous les rayons calorifiques obscurs, le verre, l'alun et, en général, tous les corps transparents et les substances translucides colorées, arrêtent ces mêmes rayons. Enfin, le sel gemme, le verre, le quartz qu'on a recouverts de noir de fumée, ne laissent plus passer la lumière, mais continuent à être traversés par les rayons calorifiques obscurs.

Quant aux rayons chimiques, ou ultra-violets, M. Ed. Becquerel a trouve que le sel gemme et le quartz les laissent passer tous, que l'eau et le verre les transmettent à un degré moindre, mais que l'essence de térébenthine et surtout le bisulfate de quinine et le verre d'urane les éteignent complètement.

CHAPITRE XVII

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE THERMODYNAMIQUE.

805. **Chaleur dégagée par les actions mécaniques.** — Il y a des sources de chaleur autres que la radiation solaire et que les réactions chimiques, les changements d'état physique et l'électricité. Tous les corps, quel

que soit leur état, peuvent devenir des sources de chaleur. Il suffit, pour cela, qu'ils soient soumis à certaines actions mécaniques, telles que le frottement, la percussion, la pression, le choc. Ainsi, l'axe d'une roue qui frotte sur ses coussinets, un marteau-pilon qui frappe sur son enclume, un gaz que l'on comprime, un boulet de canon qui choque un blindage, dégagent de la chaleur, en quantité plus ou moins considérable, et d'une manière aussi régulière que les sources calorifiques ordinaires. Nous allons entrer dans quelques détails à ce sujet.

806. **Chaleur due au frottement.** — *Le frottement de deux corps l'un contre l'autre développe une quantité de chaleur d'autant plus grande, que la pression est plus forte et le mouvement plus rapide.* En voici quelques exemples.

1° Souvent les boîtes des roues de voitures, par suite du frottement contre leurs essieux, s'échauffent jusqu'à prendre feu.

2° *Expérience de Davy.* — H. Davy a fondu deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre dans une atmosphère dont la température était au-dessous de zéro.

3° *Expériences de Rumford.* — En forant sous l'eau une masse de bronze, Rumford trouva que, pour obtenir 250 grammes de limaille, on développe par le frottement une chaleur capable d'élever 25 kilogrammes d'eau de zéro à 100°, ce qui représente 2500 calories.

4° *Expériences de Beaumont et Mayer.* — Beaumont et Mayer construisirent à Paris, en 1855, un appareil dans lequel ils chauffaient en quelques heures 400 litres d'eau de 10 à 130° par le frottement d'un cône de bois recouvert de chanvre, tournant, avec une vitesse de 400 tours par minute, dans un cône de cuivre creux, fixe et plongé dans l'eau d'une chaudière hermétiquement close. Les surfaces frottées étaient constamment graissées d'huile.

5° *Expérience de Tyndall.* — Tyndall a imaginé un petit appareil qui, en

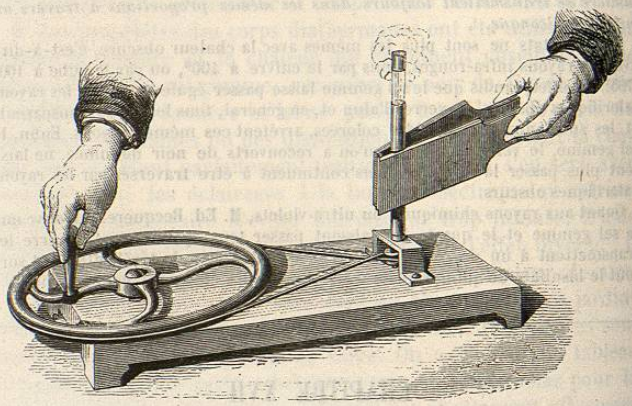

Fig. 798.

quelques minutes, rend très manifeste la chaleur développée par le frottement. Il se compose d'un tube de laiton, creux et plein d'eau, auquel on imprime un mouvement de rotation rapide au moyen d'un mécanisme très simple, représenté dans la figure 798. Le tube a 10 centimètres de hauteur et 2 de diamètre. On le remplit d'eau tiède, pour que l'expérience dure moins longtemps, et on le ferme avec un bouchon, afin que l'eau ne soit pas projetée par l'effet de la rotation. Tandis que d'une main on fait tourner le système, de l'autre on serre le tube entre deux planchettes à rainures qui forment les branches d'une sorte de pince en bois. Le tube s'échauffe alors rapidement par le frottement, et bientôt, la température de l'eau dépassant 100°, le bouchon est projeté par la tension de la vapeur.

6° *Briquet.* — Dans le briquet à pierre, c'est le frottement de l'acier contre le silex qui échauffe les parcelles métalliques qui s'en détachent, au point de leur faire prendre feu dans l'air.

807. **Chaleur due à la compression.** — Lorsqu'on bat sur l'enclume un métal malléable, on l'échauffe considérablement. Si l'on comprime un corps de manière à en augmenter la densité, sa température s'élève d'autant plus que la diminution de volume est plus grande. Peu sensible dans les liquides, ce phénomène l'est davantage dans les solides ; dans les gaz, qui sont extrêmement compressibles, il y a un dégagement de chaleur considérable. Nous en avons déjà montré un exemple par l'expérience du briquet à air (fig. 207).

De même, c'est par l'élévation de température dont elle est cause que la compression peut provoquer la combinaison, et, par suite, la détonation d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène.

Expériences de Tyndall. — 1° On prend un vase de métal à parois résistantes, et muni d'un robinet sur lequel on visse une pompe de compression. Si l'on comprime l'air dans le vase, on constate d'abord que le gaz s'est échauffé par

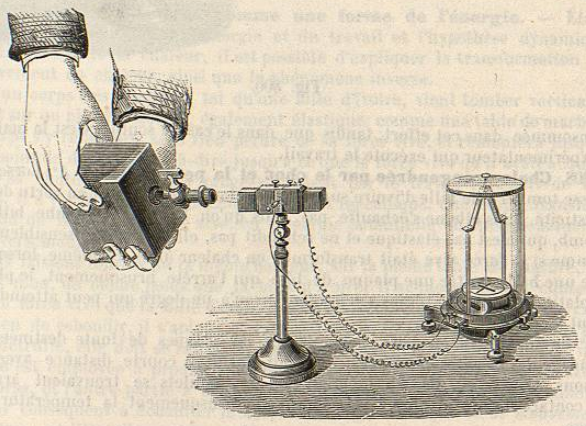

Fig. 799.

la pression. On le laisse alors refroidir pendant plusieurs heures, jusqu'à ce qu'il soit revenu à la température ambiante. Lorsqu'on ouvre ensuite le robinet, l'air s'élance violemment, expulsé par sa propre force expansive et l'on constate que cette dilatation du gaz est accompagnée d'une absorption de chaleur. En effet, si l'on reçoit le jet de gaz sur la pile thermo-électrique (fig. 799), le galvanomètre indique, par le sens de sa déviation, qu'il y a refroidissement.

Au contraire, si l'on répète l'expérience avec un soufflet ordinaire, et si l'on reçoit encore le jet de gaz sur la pile (fig. 800), la déviation de l'aiguille du galvanomètre se fait dans le sens opposé, ce qui fait voir qu'il y a échauffement.

Il faut remarquer que ces deux phénomènes inverses correspondent à des conditions mécaniques opposées. En effet, dans la première expérience, le travail mécanique étant exécuté par l'air lui-même, une portion de sa chaleur est

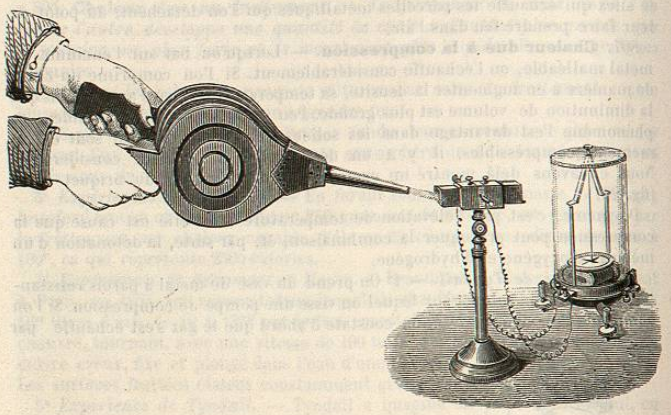

Fig. 800.

consommée dans cet effort, tandis que dans le cas du soufflet c'est la main de l'expérimentateur qui exécute le travail.

808. **Chaleur engendrée par le choc et la percussion.** — 1° Lorsqu'on laisse tomber une bille d'ivoire sur un corps dur, elle rebondit en vertu de son élasticité, mais elle ne s'échauffe pas. Mais qu'on laisse tomber une bille de plomb, qui n'est pas élastique et ne rebondit pas, elle s'échauffe sensiblement, comme si sa force vive était transformée en chaleur (604). De même, lorsqu'on tire une balle contre une plaque de tôle qui l'arrête brusquement, le plomb s'aplatit, et en même temps s'échauffe, jusqu'à un degré qui peut atteindre le point de fusion.

2° En Angleterre, en 1863, pour essayer les plaques de fonte destinées au blindage des frégates cuirassées, on tirait dessus à courte distance avec des canons Armstrong. Or, au moment où les boulets se trouvaient arrêtés au contact de ces plaques, ils atteignaient brusquement la température du rouge.

809. **Corrélation entre la chaleur et le travail.** — Il résulte de tous ces faits que, d'une manière générale, les frottements, les chocs, et toutes les résistances passives qui paraissent consommer en pure perte du travail moteur, *engendrent de la chaleur*. Dans tous les cas où il y a *destruction apparente de travail* ou de *force vive*, il y a *apparition de chaleur*. Inversement, toute *création apparente de travail* est accompagnée d'une absorption de chaleur.

Ainsi, dans une machine à vapeur, la vapeur qui sort du cylindre, après avoir *travaillé* sur le piston, possède moins de chaleur qu'en sortant de la chaudière. Les deux expériences de Tyndall citées plus haut montrent bien les deux phénomènes calorifiques inverses qui correspondent à la production ou à la destruction de travail. On peut encore citer l'expérience de la marmite de Papin. Lorsqu'on ouvre la soupape, de manière à laisser partir un jet de vapeur, celle-ci se refroidit tellement dans son travail de détente, que non seulement on peut y mettre la main sans danger, mais qu'on y ressent même une impression de froid.

Cette corrélation intime entre la chaleur et le travail mécanique était complètement inexplicable dans l'hypothèse du *fluide calorique*, cause des phénomènes calorifiques. Si l'on admet, au contraire, l'*hypothèse dynamique*, c'est-à-dire si l'on attribue la chaleur à un mouvement vibratoire particulier de la matière (603), elle devient une grandeur de même nature que la force vive, et le lien mystérieux qui l'unit au travail mécanique devient une conséquence nécessaire du principe général de la conservation de l'énergie.

810. **Chaleur considérée comme une forme de l'énergie.** — Étant données les définitions de l'énergie et du travail et l'hypothèse dynamique sur la nature de la chaleur, il est possible d'expliquer la transformation du mouvement en chaleur, ainsi que le phénomène inverse.

Si un corps très élastique, tel qu'une bille d'ivoire, vient tomber verticalement sur un plan horizontal, également élastique, comme une table de marbre, le corps s'y réfléchira, sans rien perdre de sa force vive, et remontera jusqu'à son point de départ, c'est-à-dire jusqu'à ce que la force vive qu'il avait acquise dans sa chute soit annulée progressivement par le travail résistant de son poids. Il n'y a là qu'un phénomène purement mécanique, une simple transformation de travail en force vive, ou d'énergie potentielle en énergie actuelle, et inversement.

Mais laissons tomber de la même hauteur, sur la même table de marbre, un corps mou, de même poids que la bille d'ivoire, il acquerra par sa chute la même force vive que la bille d'ivoire; mais les effets en seront différents, car, au lieu de rebondir, il s'aplatit et reste au repos. Or sa force vive ne peut pas être détruite, elle doit se retrouver sous une forme quelconque. En effet, une partie est employée à produire le travail interne d'où résulte la déformation du corps, et l'autre partie à accélérer le mouvement vibratoire moléculaire, et par conséquent à échauffer le corps. L'énergie *cinétique* ou *de mouvement* se retrouve à l'état d'*énergie calorifique*.

811. **Équivalence du travail et de la chaleur.** — Le fait de la transformation du travail détruit en chaleur sensible est précisé par un autre fait général, non moins important : *Il existe une relation numérique entre les quantités de travail détruit et de chaleur sensible correspondantes*. Cette relation est indépendante de la nature des corps qui servent d'intermédiaire pour opérer cette

transformation. On a constaté par des expériences nombreuses et variées que, toutes les fois que les substances intermédiaires n'ont éprouvé aucun changement moléculaire et se sont retrouvées, à la fin de l'expérience, dans le même état physique ou chimique qu'au commencement, il y a équivalence absolue entre le travail détruit et la chaleur créée : *à toute quantité de chaleur disparue correspond une quantité déterminée de travail effectué*, et, réciproquement, *pour tout travail anéanti il y a une certaine quantité de chaleur qui apparaît :* c'est ce fait constant qui constitue *le principe de l'équivalence de la chaleur et du travail.* C'est sur ce principe et sur l'hypothèse dynamique de la chaleur qu'est fondée la *thermodynamique* ou *théorie mécanique de la chaleur.*

On a nommé *équivalent mécanique de la chaleur*, ou mieux *équivalent mécanique de la calorie*, le travail (évalué en unités de travail), qui correspond à la disparition de l'unité de chaleur. Inversement, on appelle *équivalent calorifique du travail*, ou mieux *du kilogrammètre*, la quantité de chaleur, évaluée en calories, qui correspond à la disparition de l'unité de travail. Ces deux coefficients sont évidemment inverses l'un de l'autre.

812. **Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.** — Le docteur Mayer le premier, en 1842, a trouvé l'équivalent mécanique de la chaleur en le déduisant de considérations théoriques. Joule, en 1843, l'a déterminé par l'expérience.

1° *Calcul du Dr Mayer.* — Pour élever de 1° la température de 1 kilogr. d'air, *sous volume constant*, il faut donner à la masse une quantité de chaleur C_1 égale à $0^c,1688$: c'est sa *chaleur spécifique sous volume constant.* Pour élever de 1° la température de la même masse d'air *sous pression constante*, c'est-à-dire en la laissant se dilater librement, il faut lui donner une quantité de chaleur C égale à $0^c,2374$: c'est sa *chaleur spéficique sous pression constante.* La différence $C - C_1$ $(= \varepsilon)$ représente la chaleur absorbée dans le travail de la dilatation (on appelle quelquefois ε la *chaleur de dilatation* des gaz). Si donc on mesure d'une part ε, et d'autre part le travail $\mathcal{T}$ développé par la dilatation, l'équivalent mécanique cherché sera par définition égal à $\frac{\mathcal{T}}{\varepsilon}$.

On a déduit la valeur de ε, soit directement de l'expérience de Clément et Désormes, soit indirectement de la mesure de la vitesse du son; ces mesures ont donné

$$\frac{C}{C_1} = 1,41, \qquad \text{d'où} \qquad C - C_1 = 0^c,069.$$

D'autre part, le travail effectué par une masse d'air de 1 kilogramme qui se dilate, sous la pression de 760 millimètres, par suite d'une élévation de 1°, est facile à calculer. En effet, à 0° et sous la pression normale, 1 kilogramme d'air occupe un volume qui est égal, en mètres cubes, à $\frac{0,001}{0,0012927}$ ou $0^{mc},7367$. Ce volume augmente de $\frac{1}{273}$ de sa valeur pour une élévation de température

de 1°. Or le travail développé par un volume V de gaz qui se dilate sous la pression extérieure constante H est égal à vH, en appelant v l'accroissement de volume. Or ici H = 10 333 kilogrammes par mètre carré. On a donc

$$\mathcal{T} = vH = 10\,333 \times \frac{1}{273} \times 0,7736.$$

En faisant le calcul, on trouve $29^{kgm},281$. On a donc

$$E = \frac{29,281}{0,069} = 424^{kgm},3.$$

2° *Expériences de Joule.* — I. Il s'est d'abord servi d'un calorimètre à eau dans lequel tournait un arbre vertical muni de palettes (fig. 801). La rotation s'opérait par l'intermédiaire de

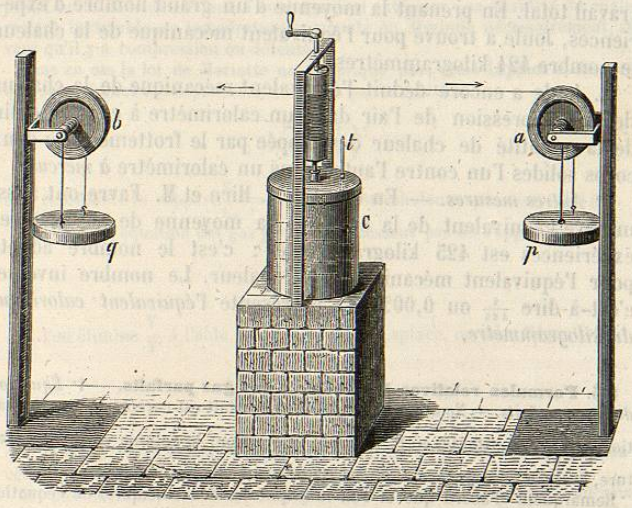

Fig. 801.

deux cordons enroulés dans le même sens sur un treuil fixé à l'arbre des palettes, mais se déroulant suivant deux tangentes diamétralement opposées; ils allaient passer sur deux poulies a et b, entraînées en sens contraires par deux poids égaux p et q.

En représentant par P la somme des poids p et q mesurée en kilogrammes, par h la hauteur de chute mesurée en mètres, le travail développé pendant la descente était Ph kilogrammètres. Ce travail était détruit par la résistance que l'eau opposait au mouvement des palettes, se transformait en chaleur et échauffait

le liquide d'un nombre de degrés mesurés par le thermomètre t. Connaissant cette élévation de température θ, le poids μ ($= m'c$) du calorimètre réduit en eau et le poids m de l'eau, on obtenait par la formule $(\mu + m)\theta$ la quantité totale de chaleur, équivalente au travail total, et par le quotient $\frac{Ph}{(m+\mu)\theta}$ le travail correspondant à une seule calorie, c'est-à-dire l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

Corrections. — Toutefois, dans cette expérience, tout le travail des poids n'était pas détruit par le frottement de l'eau; une partie était employée à vaincre les frottements du mécanisme, ou anéantie par le choc des poids contre le sol à la fin de leur chute : toutes ces pertes accessoires étaient évaluées, puis déduites du travail total. En prenant la moyenne d'un grand nombre d'expériences, Joule a trouvé pour l'équivalent mécanique de la chaleur le nombre 424 kilogrammètres.

II. Joule a encore déduit l'équivalent mécanique de la chaleur de la compression de l'air dans un calorimètre à eau, et enfin de la quantité de chaleur développée par le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre dans un calorimètre *à mercure*.

3° *Autres mesures.* — En France, M. Hirn et M. Favre ont aussi mesuré l'équivalent de la chaleur. La moyenne de ces diverses expériences est 425 kilogrammètres : c'est le nombre adopté pour l'équivalent mécanique de la chaleur. Le nombre inverse, c'est-à-dire $\frac{1}{425}$ ou 0,002353, représente l'*équivalent calorifique du kilogrammètre*.

813. **Formules relatives à la détente des gaz parfaits.** — 1° *Équation des gaz parfaits.* — Nous avons vu qu'un gaz parfait est caractérisé par l'équation $\frac{PV}{1+\alpha t} =$ constante, où P, V, t sont la pression, le volume et la température, évaluée en degrés centigrades, d'une masse déterminée du gaz.

Remarquons d'abord que si l'on multiplie les deux membres de l'équation par la constante α, le deuxième membre ne cessera pas d'être une constante et le premier deviendra $\frac{PV}{\frac{1}{\alpha} + t}$. En prenant pour α le nombre de Gay-Lussac $\frac{1}{273}$, on a $\frac{1}{\alpha} + t = 273 + t$. Ce binôme représente, comme on sait, la température absolue T, qui correspond à la température centigrade t. On peut donc écrire l'équation des gaz parfaits sous la nouvelle forme

$$\frac{PV}{T} = \text{constante}.$$

2° *Détente à température constante.* — Lorsqu'une masse de gaz se détend ou est comprimée, *sans variation de température*, son volume et sa pression

varient conformément à la loi de Mariotte. On a

$$PV = \text{constante}.$$

Cette équation se déduit immédiatement de l'équation précédente, en y faisant T = constante.

Ce cas serait réalisé par un gaz qui se détendrait dans le vide, car alors il n'y aurait ni travail interne (il n'y en a jamais dans aucun cas), ni travail externe, et par suite ni absorption ni dégagement de chaleur. Joule et Thomson ont vérifié *par une expérience directe* que la détente des gaz s'effectue, dans ce cas, *sans variation de température*.

Il n'y en aurait pas davantage, même dans le cas d'une détente sous pression, si le gaz était en communication permanente avec un réservoir indéfini qui lui prendrait la chaleur gagnée ou lui rendrait la chaleur perdue à chaque instant.

3° *Détente sans variation de chaleur.* — C'est le cas où la masse gazeuse ne prend ni ne cède de chaleur à aucun milieu extérieur : sa quantité de chaleur restant invariable, sa température augmente ou diminue nécessairement, suivant qu'il y a compression ou détente.

Dans ce cas la loi de Mariotte ne s'applique pas; mais Laplace a démontré que les volumes et les pressions sont liés par la relation

$$\frac{P}{P'} = \left(\frac{V'}{V}\right)^{\gamma},$$

où γ représente le rapport $\frac{C}{C_1}$ ($= 1,41$) des deux chaleurs spécifiques des gaz.

D'ailleurs, l'équation des gaz parfaits ne cessant pas de s'appliquer, on a

$$\frac{PV}{T} = \frac{P'V'}{T'}.$$

Si l'on élimine $\frac{V}{V'}$ à l'aide de la formule de Laplace, on aura l'équation

$$\frac{T}{T'} = \left(\frac{P}{P'}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

qui lie la variation de température à la variation de pression, quand le gaz ne cède ni ne prend de chaleur à l'extérieur.

Si, par exemple, une masse de gaz à 0° et sous la pression de 10 atmosphères se détendait brusquement jusqu'à la pression ordinaire, on déduit aisément de cette formule que la température s'abaisserait à — 133°. Cela montre l'énorme abaissement de température qu'on peut obtenir par la détente, et fait mieux comprendre le procédé employé par M. Cailletet pour la liquéfaction des gaz.

814. **Travail des machines thermiques.** — *Coefficient économique.* — On appelle *machine thermique* ou *machine à feu* tout appareil qui produit du travail en dépensant de la chaleur. Cette transformation s'opère par l'intermédiaire d'un gaz ou d'une vapeur, et conformément aux principes de la thermodynamique.

Dans la machine à vapeur, qui est le type des machines à feu, le gaz intermédiaire est la vapeur d'eau. Un certain poids d'eau, qui est à une température initiale t, est amené au contact d'une source de chaleur (chaudière); là elle se transforme en vapeur, à une température t' de beaucoup supérieure à t ; elle passe ensuite dans un cylindre où elle travaille en se détendant sur un

piston; de là elle est amenée à un refrigérant ou *condenseur*, où elle reprend sa température initiale t en repassant à l'état liquide; enfin, elle est ramenée à la chaudière, où elle recommence la même série de transformations périodiques : ce qu'on exprime en disant que la vapeur d'eau a parcouru un *cycle fermé*.

Or on a constaté par l'expérience que la quantité de chaleur Q', restituée au condenseur par l'unité de poids de vapeur d'eau, est notablement inférieure à la quantité de chaleur Q empruntée initialement au foyer. Cette chaleur *disparue* (Q — Q') correspond au *travail produit* dans le cylindre, et lui est *équivalente*.

Une machine thermique parfaite serait celle qui transformerait complètement en travail mécanique la chaleur qu'elle reçoit du foyer. Or cela n'arrive jamais, quel que soit le type de la machine. La quantité de chaleur Q', restituée au condenseur, ou perdue soit par rayonnement, soit par conductibilité, est toujours une portion notable de la quantité totale Q, de sorte que la quantité de chaleur transformée en travail n'est qu'une fraction plus ou moins petite de la quantité de chaleur totale Q.

On a appelé *coefficient économique* le rapport $\frac{Q-Q'}{Q} = C$ de la chaleur transformée à la chaleur totale dépensée : c'est ce rapport qui caractérise la valeur des machines à feu, au point de vue de leur rendement.

815. **Principe de Carnot.** — Sadi-Carnot a traité, par le calcul, le cas d'une machine thermique théoriquement parfaite, c'est-à-dire telle qu'une masse déterminée de gaz y serve d'une manière continue et indéfinie à transformer la chaleur en travail, en parcourant un cycle fermé particulier, dit *cycle de Carnot*. Il a trouvé que, pour une pareille machine, le coefficient économique C, défini précédemment par le rapport $\frac{Q-Q'}{Q}$, était donné par la formule

$$C = \frac{T - T'}{T},$$

où T représente la température maximum, comptée à partir du 0° absolu, et T' la température finale ou minimum.

816. **Travail musculaire** et **Chaleur animale.** — Le docteur Mayer eut le premier l'idée de comparer tout animal à une sorte de machine à feu où la chaleur animale, due à la respiration, est partiellement transformée en travail musculaire. M. Hirn a confirmé cette hypothèse par l'expérience. A cet effet, il enferma un homme dans une guérite close, et observa les effets calorifiques et chimiques de sa respiration, d'abord lorsque l'homme était au repos pendant un certain temps, puis lorsqu'il travaillait à élever son propre poids sur la circonférence d'une roue mobile. Deux tubes de caoutchouc aboutissaient à la bouche du sujet, l'un lui amenant, d'un gazomètre jaugé, l'air nécessaire à la respiration, et l'autre conduisant l'air expiré à un second gazomètre aussi jaugé : ce qui permettait de mesurer l'oxygène consommé et l'acide carbonique produit. La température de l'air dans la guérite s'élevait progressivement, et devenait constante lorsque la chaleur perdue par le rayonnement égalait celle qui se produisait dans l'organisme. On remplaçait ensuite le sujet vivant par la flamme d'un bec de gaz, qu'on réglait de manière à amener l'air dans la guérite à la même température constante. Du volume du gaz brûlé on déduisait la quantité de chaleur produite par le bec de gaz, et par suite la quantité dégagée par l'homme dans un temps donné.

Au repos, celui-ci consommait 30 grammes d'oxygène par heure pour 150 calories produites; lorsqu'il s'élevait sur la roue, il consommait 130 grammes d'oxygène, et le nombre de calories correspondant, qui aurait dû être 750, n'était que de 250. Donc 500 calories étaient consommées : 1° par le travail musculaire intérieur; 2° par le travail extérieur nécessaire pour élever le poids de l'homme.

L'effet inverse s'observe quand un homme reçoit du travail au lieu d'en produire, quand il descend au lieu de monter : à 30 grammes d'oxygène absorbé correspond un dégagement supérieur à 150 calories, l'excès de chaleur étant dû au travail extérieur de la pesanteur pendant la descente.

Enfin, M. Béclard a constaté que, lorsqu'on soulève un poids, l'échauffement des muscles est beaucoup moindre que lorsque la contraction se produit sans charge.

CHAPITRE XVIII

MACHINES THERMIQUES.

817. **Machines à vapeur.** — Les *machines à vapeur* sont des appareils qui servent à utiliser la force élastique de la vapeur d'eau comme force motrice. Dans les machines généralement usitées, la vapeur, en se détendant, imprime à un piston un mouvement rectiligne alternatif, qui est ensuite transformé en un mouvement circulaire continu, à l'aide de divers organes mécaniques. Ces machines sont dues à Watt, célèbre ingénieur anglais. Nous décrirons ci-après les deux types principaux de machines à vapeur, à savoir la *machine fixe* et la *locomotive*, et nous indiquerons le principe des autres machines.

Toute machine à vapeur se compose de deux parties bien distinctes, l'appareil où se produit la vapeur et la machine proprement dite.

818. **Générateur de vapeur.** — On appelle *générateur*, ou *chaudière*, l'appareil qui sert à la production de la vapeur. La figure 802 représente une vue longitudinale et la figure 803 une coupe transversale d'un générateur de machine fixe. Ceux des locomotives et des bateaux à vapeur en diffèrent beaucoup.

Chaudière à bouilleurs. — Ce générateur consiste en un long cylindre de tôle PQ fermé à ses deux extrémités par deux calottes sphériques. Au-dessous sont deux cylindres B, B, d'un plus petit diamètre, également en tôle, et communiquant avec le générateur chacun par deux tubulures. Ces cylindres se nomment *bouilleurs*. Destinés à recevoir le coup de feu du foyer, ils sont complètement remplis d'eau, tandis que le cylindre PQ l'est seulement à un peu plus de moitié. Au-dessous des bouilleurs est le foyer, dans lequel on brûle de la houille ou du coke. Afin de multiplier la