

nution totale d'énergie de la masse d'eau chaude. — Lorsqu'on écrit que la quantité de chaleur gagnée par l'eau provenant de la fusion est égale à la quantité de chaleur perdue par l'eau chaude, on admet en réalité que, dans ce système de corps, il y a communication d'énergie d'un corps à un autre, transformation de cette énergie d'une forme en une autre, mais qu'il y a toujours conservation de l'énergie totale du système de corps mis en présence (*).

2° Considérons maintenant un phénomène de condensation de vapeur, et soit, par exemple, 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100° sous la pression atmosphérique, séparé de l'air extérieur par un piston mobile; mettons cette vapeur en présence d'une masse d'eau froide contenue dans un calorimètre, en quantité suffisante pour déterminer la condensation de toute la vapeur, de telle sorte que la température finale soit de 100°. — L'eau du calorimètre éprouve à la fois une élévation de température, c'est-à-dire un accroissement d'énergie actuelle, et un accroissement de volume, c'est-à-dire un accroissement d'énergie potentielle (590), (en négligeant toutefois le travail extérieur correspondant à la petite variation du volume de cette eau); la somme de ces deux quantités constitue l'accroissement de l'énergie totale de l'eau du calorimètre. — La vapeur se condensant sans abaissement de température, l'eau de condensation n'a éprouvé aucune perte d'énergie actuelle; les molécules se rapprochant au moment de la condensation, les forces moléculaires sont motrices, la masse d'eau condensée a donc éprouvé une diminution considérable d'énergie potentielle. — Il ne serait pas exact, dans ce cas particulier, de considérer, comme dans le cas précédent, la perte d'énergie potentielle de la masse d'eau condensée comme égale à l'accroissement de l'énergie totale de l'eau du calorimètre. Il faut remarquer, en effet que, pendant la condensation, le piston s'est abaissé sous l'action de la pression atmosphérique; on doit donc considérer l'énergie totale du système après la condensation, comme s'étant accrue du travail effectué, sur le système des corps, par la pression atmosphérique (**).

394. — Coefficient économique des machines thermiques. — Principe de Carnot. — On donne le nom général de machines thermiques, aux ma-

(*) La quantité d'énergie échangée, pour la fusion de 1 kilogramme de glace, correspond, comme on l'a vu (549), à une quantité de chaleur représentée par 80 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 80×425 , ou 54000 kilogrammètres.

(**) L'accroissement d'énergie totale du calorimètre, après la condensation de 1 kilogr. de vapeur d'eau, correspond à 557 grandes calories (534), équivalentes à 228 225 kilogrammètres. — Le travail extérieur reçu par l'eau, pendant la condensation, est $\frac{228\ 225}{15} = 17\ 556$ kilogrammètres. La perte d'énergie potentielle de l'eau condensée est $\frac{12}{15} \times 228\ 225 = 210\ 699$ kilogrammètres.

chines qui servent à transformer la chaleur en travail utile. — Dans une machine à vapeur, par exemple, la chaleur dégagée par la combustion du charbon, dans le foyer, se transmet à l'eau de la chaudière : la vapeur est l'intermédiaire qui sert à la transformation d'une partie de cette chaleur en travail, par le déplacement des résistances à vaincre.

Considérons une machine à vapeur, munie d'un condenseur, et arrivée à une période d'activité régulière. Dans un intervalle de temps déterminé, une certaine quantité d'eau, puisée dans le condenseur, vient emprunter à la chaudière, que nous appellerons la source chaude, la quantité de chaleur Q nécessaire à sa conversion en vapeur; dans le cylindre, une partie de cette chaleur se transforme en travail, par le déplacement du piston; la vapeur revient ensuite au condenseur, que nous appellerons la source froide, et, en revenant à l'état liquide et dans les conditions initiales de température, elle lui abandonne une quantité de chaleur Q' . On sait mesurer ces quantités Q et Q' (584). On en déduit la quantité de chaleur transformée en travail $Q - Q'$.

— On appelle coefficient économique d'une machine, le rapport $\frac{Q - Q'}{Q}$ de la quantité de chaleur transformée en travail à la quantité totale de chaleur fournie.

La théorie montre que, si la machine était parfaite, son coefficient économique serait représenté numériquement par l'expression

$$\frac{T - T'}{T}, \quad \text{ou bien} \quad 1 - \frac{T'}{T},$$

dans laquelle T et T' représentent les températures absolues de la source chaude et de la source froide. On entend par températures absolues, les températures comptées à partir d'un zéro absolu, qui serait situé, dans le thermomètre à air, à 275 degrés au-dessous de la glace fondante (*).

Cette règle, qui résulte de considérations émises par Sadi Carnot en 1824, a été désignée depuis sous le nom de principe de Carnot. — Le principe de Carnot est d'ailleurs applicable à toutes les questions relatives à la transformation de la chaleur en travail : il a fourni des conséquences dont l'importance est comparable à celle du principe même de l'équivalence de la chaleur et du travail.

395. Coefficient économique réel ou rendement des machines thermiques. — Les conditions de perfection, que la théorie suppose réalisées dans l'installation de la machine à vapeur, ne sont jamais pratiquement réalisables : la chaleur que la machine cède à l'air et aux corps qui l'environnent, les trépidations imprimées à ses divers organes, constituent autant de causes de déperdition d'énergie, qu'il est impossible de supprimer complètement. —

(*) On est conduit à la considération du zéro absolu par l'emploi du thermomètre à air (205). Dans cet instrument, le degré de température est défini par une variation de force élastique du gaz, dont la valeur est $\frac{1}{275}$ de la force élastique à la température de la glace fondante. Or, si l'on suppose que l'air passe successivement par une série de températures inférieures à celle de la glace fondante, et si l'on admet que la force élastique continue à décroître toujours de la même manière, on est conduit à ce résultat que, à 275 degrés au-dessous du zéro ordinaire, la force élastique de l'air devrait avoir diminué des $\frac{275}{275}$ de sa valeur initiale, c'est-à-dire que la force élastique devrait devenir nulle.

C'est cette température que l'on prend pour zéro absolu. — Étant donnée la température t d'un corps, comptée à partir du zéro ordinaire, on en déduit immédiatement la température absolue T , comptée à partir du zéro absolu, $T = 275 + t$.

On appelle *coefficient économique réel*, ou *rendement*, le rapport entre la quantité de chaleur qui correspond au travail réellement utilisé par une machine, et la quantité totale de chaleur fournie. — Quelque soignée que soit la construction de la machine, l'expérience montre que ce rapport est toujours bien inférieur au coefficient économique théorique.

Considérons, par exemple, une machine à vapeur, fonctionnant à 5 atmosphères, et où la température du condenseur serait maintenue à 40° centigrades. A la pression de 5 atmosphères, correspond, pour la vapeur d'eau, une température de 153° centigrades; la température T de la chaudière (source chaude), comptée à partir du zéro absolu, est donc 153 + 273, ou 426. La température absolue T' du condenseur (source froide), est 40 + 273, ou 313. Le coefficient économique *théorique* de cette machine, calculé comme il vient d'être dit (394), serait donc : $1 - \frac{313}{426}$ ou 0,26, c'est-à-dire que, théoriquement,

le travail produit par la machine devrait représenter environ $\frac{1}{4}$ de la chaleur fournie. — Or, en mesurant directement, dans ces machines à moyenne pression, le travail utile et la chaleur fournie, pendant un temps déterminé, on trouve que le coefficient économique *réel* n'est guère, pour les machines les mieux construites, que $\frac{1}{8}$, ou quelquefois $\frac{1}{7}$.

Cependant l'expérience montre que le coefficient économique *réel* *augmente*, comme le coefficient théorique, à mesure que les machines fonctionnent à *des températures plus élevées*. Aussi est-ce dans ce sens que l'industrie tend à perfectionner la construction des machines à vapeur. — La principale difficulté qu'on rencontre, dans cette voie, consiste dans l'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur d'eau avec la température (279) : on arriverait à atteindre des pressions dangereuses pour la sécurité. On cherche aujourd'hui à tourner cette difficulté, en employant de la vapeur *surchauffée*, c'est-à-dire en faisant passer la vapeur, après sa sortie de la chaudière, dans des tubes où elle est portée à une température beaucoup plus haute. La force élastique de cette vapeur *non saturante* n'augmente, par l'élévation de température, que comme augmenterait celle d'un gaz dans les mêmes conditions. On peut ainsi accroître beaucoup la température T, sans arriver à des pressions trop considérables.

Enfin, les *machines à gaz*, qui fonctionnent entre des limites de températures extrêmement éloignées, donnent, par cela même, un coefficient économique généralement bien supérieur à celui des machines à vapeur. Il peut atteindre et même dépasser la valeur $\frac{1}{2}$, pour certaines de ces machines.

396. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes chimiques. — Lorsque deux corps mis en présence arrivent à se combiner chimiquement, la combinaison dégage toujours de la chaleur.

Les expériences calorimétriques ont montré que 1 gramme d'hydrogène et 35^{gr},5 de chlore, occupant à 0° et sous la pression normale des volumes égaux, dégagent 22 grandes calories, en donnant 56^{gr},5 de gaz chlorhydrique, à 0° et sous la pression normale, sans changement de volume. On doit donc admettre que, avant la combinaison, ces masses d'hydrogène et de chlore possédaient, à l'état *potentiel*, une énergie de 22 × 425 ou 9350 kilogrammètres, que l'on retrouve après la combinaison, dans le calorimètre, à l'état *d'énergie actuelle*. — Comme il n'y a aucun changement d'état physique, la *chaleur dégagée*,

proportionnelle à la diminution d'énergie potentielle, *mesure le travail résultant des affinités chimiques* au moment de la combinaison.

Quand 1 gramme d'hydrogène et 8 grammes d'oxygène, pris à une température supérieure à 100° et sous la pression atmosphérique, se combinent pour donner de la vapeur d'eau, dans les mêmes conditions de température et de pression, il y a diminution de volume; par conséquent, la chaleur dégagée 29^{gr},5, ou mieux, l'énergie correspondante 29,5 × 425 kilogrammètres, mesure la somme de l'énergie potentielle disparue et du travail reçu par les gaz au moment de la contraction. Mais le second terme de cette somme est négligeable, par rapport au premier; aussi peut-on dire d'une manière générale que, *quand deux gaz en se combinant donnent un produit gazeux, la chaleur de combinaison peut servir de mesure au travail résultant des affinités chimiques*.

La proposition n'est plus exacte lorsque la combinaison est accompagnée d'un changement d'état physique : dans ce cas, la variation d'énergie potentielle est due, à la fois, au travail des forces physiques qui interviennent dans le changement d'état et au travail des affinités chimiques.

Inversement, pour effectuer la décomposition d'un corps composé, il faut, en général, lui fournir une quantité de chaleur égale à celle que ses éléments auront dégagée au moment de leur combinaison. — En d'autres termes, pour mettre en liberté deux corps combinés, il faut emprunter, à une source de chaleur, une quantité déterminée d'énergie, qui s'accumule dans ces corps à l'état *potentiel* (*).

Les phénomènes chimiques sont donc soumis, aussi bien que tous les autres phénomènes, au principe de la *conservation de l'énergie*.

397. Principe du travail maximum. — On démontre, en Mécanique, que si un système de corps peut se mettre en équilibre dans plusieurs positions, *la stabilité de l'équilibre est d'autant plus grande, que l'énergie potentielle correspondante à cette position est plus petite*. — La combinaison de deux corps, hydrogène et oxygène, n'est donc autre chose que le passage d'une position d'équilibre à une autre position plus stable; la diminution d'énergie potentielle qui résulte de ce passage est mesurée par la quantité de chaleur dégagée dans la réaction.

Quand un système de corps est dans une position d'équilibre, il ne peut pas passer, de lui-même, à une autre position; mais si une cause extérieure vient à le déranger, il tend, en général vers la position de l'équilibre le plus

(*) Certains composés chimiques, tels que les combinaisons oxygénées de l'azote, le chlorure d'azote et quelques autres, abandonnent au contraire de la chaleur en se détruisant. Ces composés ont reçu le nom général de *corps explosifs*, parce que, dans certains cas, la chaleur mise en liberté au moment de leur décomposition peut donner à leurs éléments, amenés à l'état gazeux, une force expansive capable de produire une explosion. — Pour les composés de ce genre, c'est dans la combinaison toute formée qu'on doit admettre une énergie potentielle, se traduisant par l'apparition d'énergie calorifique, au moment où cette combinaison se détruit. Il est d'ailleurs digne de remarque qu'il est impossible de produire ces combinaisons directement, en mettant en présence leurs éléments séparés.

stable, celle qui correspond à la plus grande diminution de l'énergie potentielle. — De même, quand plusieurs corps capables de réagir les uns sur les autres sont en présence, il faut généralement, pour déterminer la réaction, les déranger de leur état d'équilibre initial, soit par une élévation de la température, soit par une étincelle électrique, soit par une brusque compression; une fois l'équilibre rompu, le système tend vers l'état d'équilibre le plus stable, c'est-à-dire que l'énergie potentielle diminuant le plus possible, les forces moléculaires accomplissent le travail moteur maximum; autrement dit, les corps tendent à donner la réaction chimique qui correspond au plus grand dégagement de chaleur.

Tel est le sens du principe du *travail maximum*, dont M. Berthelot a fait le principe fondamental de la Thermochimie.

398. Origine de la chaleur et du mouvement chez les animaux. — Chez les animaux, l'oxygène introduit dans le sang par la respiration produit une véritable combustion des éléments organiques : l'acide carbonique et la vapeur d'eau, qui apparaissent dans les produits de la respiration, proviennent de l'hydrogène et du carbone qui étaient contenus dans les aliments ou dans les tissus de l'animal, mais qui n'y étaient combinés qu'avec une faible quantité d'oxygène. De même, l'urée, qui est éliminée par les urines, est un produit de la combustion des matières azotées. — C'est la diminution d'énergie potentielle, correspondante à ces phénomènes de combustion, qui constitue la source de production de la chaleur animale.

Si maintenant l'animal exécute des mouvements, s'il produit un *travail*, une partie de l'énergie fournie par les combinaisons chimiques est employée à l'accomplissement de ce travail, absolument comme, dans une machine à vapeur en activité, une partie de la chaleur développée par le combustible est convertie en travail utile (*).

Cette manière d'envisager les phénomènes de mouvement chez les animaux, formulée dès 1845 par Jules-Robert Mayer, médecin à Heilbronn, a reçu une remarquable confirmation par les expériences de Hirn, en 1858. — Ces expériences ont montré que, pour 1 gramme d'oxygène absorbé, la quantité de chaleur restée à l'état de chaleur sensible est toujours moindre pendant le mouvement que pendant le repos. En d'autres termes, à une même dépense d'énergie respiratoire, correspond l'apparition d'une énergie calorifique moindre pendant le mouvement que pendant le repos; la différence représente l'énergie mécanique qui correspond au travail effectué (**).

(*) D'après M. Helmholtz, quand un homme gravit une montagne, le travail qu'il effectue en élevant son propre poids est égal à la cinquième partie de l'énergie correspondant à la combustion respiratoire effectuée pendant le même temps. En d'autres termes, le coefficient économique de la machine humaine (394) est $\frac{1}{5}$. Cette machine présente donc une perfection remarquable, eu égard aux limites étroites de température entre lesquelles elle fonctionne (395).

(**) Il est essentiel de remarquer que ces résultats ne sont pas en contradiction avec ce fait, d'observation journalière, qu'un exercice violent amène généralement

C'est donc le travail des affinités chimiques, c'est-à-dire l'énergie rendue disponible par la combustion des aliments ou des tissus, qui est en définitive la cause de nos mouvements. L'animal, doué de mouvement volontaire, ne crée pas plus la force nécessaire à l'accomplissement de ses divers actes, qu'une machine thermique ne crée la force qui rend ses organes capables d'effectuer un travail mécanique. « L'intervention de la volonté, comme l'a dit Robert Mayer, est seulement assimilable à celle du machiniste qui, dans un navire à vapeur, distribue à la machine, d'une manière intelligente, l'énergie mise en liberté par la combustion du charbon. »

399. Absorption de la chaleur solaire, pour le développement des végétaux. — Dans les végétaux, les phénomènes chimiques de la vie sont, pour ainsi dire, inverses de ceux de la vie animale. Le végétal peut être considéré comme empruntant, au milieu qui l'environne, l'eau et l'acide carbonique, pour les convertir en des composés dont l'oxygène est éliminé presque en totalité, et qui sont formés principalement d'hydrogène et de carbone; les substances des tissus végétaux sont, comme on l'a dit quelquefois, des matières *débrûlées*.

Le développement des tissus végétaux constitue donc un phénomène contraire aux affinités chimiques; il exige que le végétal emprunte, à une source extérieure, l'énergie nécessaire au travail de séparation des éléments de l'eau, de l'acide carbonique, ou d'autres substances plus ou moins complexes. — Cette source d'énergie n'est autre que le Soleil : l'énergie que la plante utilise, c'est la force vive du mouvement vibratoire des radiations solaires, qui lui parvient sous forme d'énergie calorifique ou lumineuse.

Il n'y a donc, là encore, qu'une transformation d'énergie. Les éléments des tissus végétaux, formés aux dépens de composés dont l'oxygène a été presque entièrement éliminé, ont acquis par cela même, un accroissement d'énergie potentielle; cette énergie pourra reparaitre à l'état d'énergie actuelle le jour où ces éléments éprouveront une combustion les ramenant à l'état d'eau et d'acide carbonique.

400. Le Soleil est la source de tout mouvement à la surface de la Terre. — L'ensemble des considérations qui précèdent, et dont Robert Mayer a fait ressortir la valeur, conduit à envisager le Soleil comme la source de toute énergie, à la surface de notre globe.

L'animal trouve, dans la combustion des matériaux de ses aliments, l'énergie nécessaire à ses mouvements (398). Or, un grand nombre

le corps humain à une température plus élevée que pendant le repos. La mesure des gaz absorbés montre, en effet, que les mouvements musculaires activent considérablement la respiration. Dès lors, l'énergie respiratoire mise en jeu dans le même temps étant beaucoup plus considérable, on conçoit que la température du corps puisse s'élever, bien qu'une partie de cette énergie soit employée au travail extérieur, si l'autre partie, restant à l'état d'énergie calorifique, est supérieure à la valeur qu'elle a pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure.

d'animaux sont exclusivement herbivores : ceux qui sont carnivores se nourrissent d'animaux qui ont pris eux-mêmes au règne végétal les éléments de leurs tissus. Dès lors, toutes les substances qui interviennent, comme combustibles, dans la respiration des animaux, sont empruntées aux végétaux, soit directement, soit indirectement. — D'autre part, les végétaux empruntent à la chaleur solaire l'énergie nécessaire à la formation de ces substances combustibles elles-mêmes (399). — C'est donc la chaleur solaire qui est la source des mouvements effectués par les animaux : les végétaux constituent des intermédiaires, qui gardent en réserve l'énergie fournie par le soleil, et la fournissent à leur tour aux animaux qu'ils alimentent.

Quant aux mouvements effectués par nos machines à feu, ils empruntent à la même origine l'énergie qui y est mise en jeu. — Pour les machines alimentées par la combustion du bois, la chose est évidente, d'après ce qui vient d'être dit. — Les machines qui sont alimentées par la combustion de la houille ne font qu'emprunter, au combustible enfoui dans le sol, l'énergie que la chaleur solaire avait accumulée dans les végétaux des siècles passés.

C'est la chaleur solaire qui transforme en vapeur les eaux des mers, des lacs ou des fleuves, et qui contribue ainsi à la formation des nuages; l'énergie accumulée par la vaporisation, dans ces masses d'eau suspendues au sein de notre atmosphère, reparaît à l'état d'énergie sensible, quand elles retombent sous la forme de pluie ou de neige, et viennent former les torrents, les rivières, les fleuves qui descendent vers la mer. — C'est la force vive de ces cours d'eau que nous utilisons, pour mettre en mouvement nos machines hydrauliques.

C'est encore la chaleur solaire qui produit, dans notre atmosphère, ces mouvements continus qui constituent les vents, et qui transportent l'air d'une région du globe à une autre. — Quand l'homme utilise cette force vive de translation de l'air, pour gonfler les voiles des navires ou pour faire tourner les ailes des moulins, il ne fait encore qu'employer, pour un travail utile, une énergie dont l'origine est tout entière dans la force vive des radiations émises par le Soleil.

LIVRE TROISIÈME

ACOUSTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON

I. — PRODUCTION DU SON

401. Production du son en général. — Un son est toujours produit par un mouvement vibratoire, imprimé à un corps matériel.

Ainsi, quand un verre à boire a été ébranlé par un choc, il produit un son : si l'on applique le doigt sur le bord du verre, on sent une sorte de frémissement, que l'on exprime en disant que le verre *vibre*. Dès que le contact du doigt fait cesser la vibration, on entend le son s'éteindre.

Prenons de même un *diapason* (fig. 253), et faisons-lui rendre un son, en écartant ses branches avec une tige de bois et faisant sortir vivement la tige par l'extrémité de la fourche. En appliquant le doigt sur l'une des branches, nous la sentons vibrer, et le son s'éteint quand la vibration cesse.

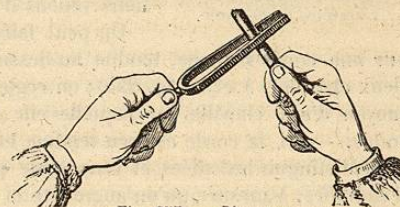


Fig. 253. — Diapason.

Les sons produits par les tuyaux d'orgue résultent également d'un mouvement vibratoire. Nous verrons que ce mouvement réside dans la masse d'air que contient le tuyau.

402. Mouvement vibratoire. — Pour nous faire une idée plus précise des mouvements qui produisent les sons, fixons dans un étau une lame d'acier AC (fig. 254), et laissons d'abord une assez grande longueur à la partie située au-dessus de l'étau. Si nous l'écartons avec le doigt, de manière à l'amener dans la position Ca, et si nous l'abandonnons, nous la voyons exécuter une série de mouvements, de part et