

403. Effets de la chaleur sur les corps solides ou liquides. Travail intérieur, accompagnant la variation de volume. — Lorsqu'on fournit une certaine quantité de chaleur à un corps *solide* ou *liquide*, elle produit, comme dans un gaz, des effets de diverses natures; mais les proportions relatives de chaleur qui correspondent à chacun de ces effets sont tout autres.

Fournissons à un bloc de fer, ayant pour volume 1 décimètre cube, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 100 degrés. — Le coefficient de dilatation cubique du fer étant beaucoup moindre que celui des gaz, l'accroissement de volume est beaucoup plus petit qu'il ne serait pour un gaz. Par suite, le *travail extérieur* résistant, qui correspond au déplacement de la surface pressée par l'atmosphère, est très petit. Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va nous apparaître comme une quantité négligeable. — Si en effet on voulait produire, sur ce même bloc de fer maintenu à sa température primitive, un accroissement de volume pareil à celui que produit ici la chaleur, l'expérience montre qu'il faudrait exercer, sur chacune de ses faces, une traction de plusieurs centaines de mille kilogrammes. Dès lors, les molécules de ce corps doivent être considérées comme maintenues à des distances déterminées, par des forces considérables. La chaleur, en écartant les molécules les unes des autres, accomplit donc ici un *travail intérieur* résistant, qu'il est difficile d'évaluer avec précision, mais dont la valeur est très grande. — En outre, la masse de fer ayant maintenant acquis la propriété d'exercer sur le thermomètre une action différente de son action primitive, il y a eu accroissement de *chaleur sensible*, c'est-à-dire accroissement des forces vives de ses molécules.

En général, on peut dire qu'une quantité de chaleur déterminée, fournie à un corps solide ou liquide, se répartit de la manière suivante : — 1° Une partie de cette chaleur est employée à l'accomplissement du travail extérieur résistant; mais ce n'est là qu'une quantité généralement négligeable, dans les conditions ordinaires. — 2° Une autre partie est employée à accomplir un *travail intérieur* résistant, c'est-à-dire à produire l'écartement des molécules malgré les forces moléculaires; c'est la partie la plus considérable. — 3° La partie complémentaire reste à l'état de *chaleur sensible* : c'est l'équivalent calorifique de l'accroissement des forces vives des molécules (*).

actions moléculaires ne peuvent être considérées comme nulles, que pour un corps qui présenterait l'état gazeux parfait.

(*) Rappelons ici quelques faits bien connus, qui montrent la grandeur des effets mécaniques que peuvent produire les corps solides ou liquides, lorsqu'ils éprouvent des variations de température, dans des conditions où des obstacles résistants tendent à s'opposer à leurs variations de volume.

Des barres de fer, scellées à leurs deux extrémités dans la pierre, peuvent occasionner, par leurs variations de température, des ruptures dans les édifices les plus

404. Passage de l'état solide à l'état liquide. — Chaleur de fusion. — Quand un corps solide atteint une température déterminée, une nouvelle addition de chaleur le fait passer, en totalité ou en partie, à l'état liquide; c'est le phénomène de la fusion.

Or, de ce que la température reste constante pendant tout le temps que dure la fusion, on doit conclure qu'aucune partie de la chaleur fournie ne reste à l'état de *chaleur sensible*. Par suite, pendant la fusion, la somme des forces vives moléculaires du corps n'est pas modifiée. Toute la force vive cédée au corps a donc disparu. — Quant au travail extérieur, il est négligeable, lorsque le corps est placé dans l'atmosphère, eu égard à la petitesse de la variation de volume (*).

La chaleur fournie pendant la fusion correspond donc presque tout entière à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires, les molécules ont été amenées dans des positions relatives différentes de celles qu'elles avaient à l'état solide, à la même température. — Cette chaleur absorbée a d'abord reçu le nom de *chaleur latente*, pour indiquer qu'elle n'est pas sensible au thermomètre : il est préférable de l'appeler *chaleur de fusion*.

405. Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Chaleur de vaporisation. — Un liquide auquel on fournit des quantités de chaleur graduellement croissantes, et dont la surface est soumise à une pression invariable, atteint en général une température à laquelle il entre en ébullition : à partir de ce moment, la température reste constante, toute la chaleur fournie étant employée à convertir le liquide en vapeur. — Voyons comment cette chaleur est utilisée.

Et d'abord, la température ne s'élevant pas, aucune partie de la chaleur communiquée ne reste à l'état de *chaleur sensible*, c'est-à-dire que toute la force vive communiquée au liquide a disparu.

Quant au *travail extérieur* résistant, il n'est pas négligeable comme

solides. — Les feuilles de plomb ou de zinc, qui sont employées pour les toitures, arrachent les clous qui les fixent, lorsque le froid de l'hiver les fait contracter : on est obligé de les superposer comme des tuiles, pour permettre à la dilatation de se produire. — On comprend de même la nécessité de ménager des intervalles entre les rails successifs d'une voie ferrée; si ces intervalles sont insuffisants, les chaleurs de l'été arrivent à produire des déformations de la voie.

Lorsqu'un vase de verre a été entièrement rempli d'un liquide, et hermétiquement bouché, il suffit d'une élévation de température de quelques degrés pour briser le vase, alors même qu'il présente une grande résistance.

(*) Au moment de la fusion, la variation de volume est d'ailleurs tantôt un accroissement, comme cela a lieu pour la plupart des corps, tantôt une diminution, comme cela a lieu pour l'eau et pour quelques autres substances. Le travail extérieur, dû au déplacement de la surface qui supporte les pressions extérieures, est donc tantôt résistant, tantôt moteur : il est toujours négligeable dans les circonstances ordinaires. Quand on lui donne des valeurs assez grandes, en augmentant la pression extérieure, les phénomènes deviennent plus complexes : il y a à la fois variation dans la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion, et modification de la température de fusion, comme on l'a indiqué (271).

il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. Ce travail doit donc correspondre à une partie notable de la chaleur absorbée par le corps, pendant l'ébullition. — L'autre partie de la chaleur fournie correspond à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide, les molécules ont été amenées à des distances telles, que leurs actions réciproques deviennent négligeables.

Si l'on prend comme exemple l'ébullition de l'eau, on peut montrer, par un calcul simple, que la *chaleur de vaporisation*, c'est-à-dire la quantité de chaleur employée à la transformation du liquide en vapeur, correspond, pour $\frac{1}{15}$ de sa valeur, à l'accomplissement du travail extérieur, dû à la pression atmosphérique; pour les $\frac{12}{13}$, à l'accomplissement du travail intérieur, dû aux actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide (*).

III. — CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

406. Énergie actuelle, énergie potentielle, énergie totale. — Dans les divers phénomènes que nous venons de passer en revue, on a pu constater que l'addition d'une certaine quantité de chaleur à un corps quelconque produit, en général, trois effets : *travail extérieur* résistant, *travail intérieur* résistant, et *accroissement de force vive des molécules* (chaleur sensible, élévation de la température). — On peut comprendre ces trois effets sous une même dénomination, en disant qu'une addition de chaleur à un corps lui communique, sous des formes diverses, un *accroissement d'énergie*. L'énergie d'un corps, est la faculté que possède ce corps de produire du travail (51). L'énergie totale se compose de l'énergie actuelle et de l'énergie potentielle.

On appelle *énergie actuelle* d'un corps, la force vive qui s'y manifeste, soit par un mouvement de translation commun à tous ses points, soit par des mouvements relatifs des points les uns par rapport aux autres. — Quand, à la suite d'une addition de chaleur, la

(*) Voici ce calcul. — En tenant compte de la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'eau liquide, on trouve facilement que le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur à 100° est égal à environ 1700 fois celui de l'eau qui l'a produite. Pour obtenir le travail *extérieur* résistant, il suffit de multiplier la pression p sur l'unité de surface, savoir 10553 kilogrammes, par l'accroissement de volume u exprimé en mètres cubes, savoir 17556 kilogrammètres. Pour évaluer la *quantité de chaleur* que représente ce travail extérieur, il suffit de diviser ce nombre par l'équivalent mécanique 425, ce qui donne 41 calories : en comparant cette quantité à la quantité totale de chaleur absorbée par l'eau pendant la vaporisation, 357 calories, on voit qu'elle en est environ la treizième partie. — Le reste de la chaleur fournie pendant l'ébullition, c'est-à-dire 496 calories (ou les $\frac{12}{13}$ de la quantité totale), représente le travail *intérieur* résistant des actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide.

température d'un corps s'élève, la force vive de chacune de ses molécules augmente, c'est-à-dire que l'énergie actuelle du corps s'accroît.

L'énergie potentielle, ou *énergie de position*, dépend de la position relative des molécules du corps. — Quand un corps passe d'un état déterminé à un autre état, si le travail des forces moléculaires ou le travail des pressions extérieures est *moteur*, c'est-à-dire si les molécules obéissent aux forces qui les sollicitent, l'énergie potentielle du corps *diminue*, puisque sa faculté de produire du travail diminue d'autant. Mais inversement, si, à la suite d'une addition de chaleur, le passage de l'état initial à l'état final est accompagné d'un travail *résistant* des forces moléculaires ou des pressions extérieures, l'énergie potentielle du corps *augmente* d'autant.

407. Conservation et transformations de l'énergie, dans les phénomènes physiques. — Envisageons, au point de vue qui vient d'être indiqué, quelques-uns des phénomènes physiques les plus simples.

Soit, par exemple, 1 kilogramme de glace à 0°, que l'on plonge dans une masse d'eau chaude, à une température suffisante pour déterminer la fusion de la masse de glace tout entière. — La glace fond sans élévation de température, c'est-à-dire que la force vive moléculaire de l'eau de fusion reste la même; en d'autres termes, cette eau n'éprouve aucun accroissement d'énergie actuelle. Toute la chaleur que la glace absorbe est employée au travail intérieur résistant, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (404) : l'eau de fusion acquiert donc simplement un accroissement d'énergie potentielle, capable de reparaitre à l'état de chaleur sensible si cette même eau revenait à l'état solide. — Quant à la masse d'eau chaude dans laquelle la glace est plongée, on y constate : 1° un abaissement de température, c'est-à-dire une diminution d'énergie actuelle; 2° une diminution de volume, c'est-à-dire une production de travail intérieur moteur, correspondant à une diminution d'énergie potentielle. La somme de ces deux quantités constitue la diminution 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 (*).

408. — Considérons de même 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100°,

(*) La quantité d'énergie échangée, pour la fusion de 1 kilogramme de glace, correspond, comme on l'a vu (539), à une quantité de chaleur représentée par 80 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 80×425 , ou 34000 kilogrammètres.

que l'on met en présence d'une masse d'eau froide, en quantité suffisante pour déterminer la condensation de toute la masse de vapeur. — La vapeur se condense sans abaissement de température : l'eau de condensation n'éprouve donc aucune diminution d'énergie actuelle. La chaleur que la vapeur abandonne doit donc être considérée comme correspondant, 1° au travail extérieur moteur, accompli par la pression de l'atmosphère, au moment de la diminution considérable du volume primitivement occupé par la vapeur; 2° au travail intérieur moteur, accompli par les actions moléculaires de l'eau, dans son retour à l'état liquide. La somme de ces deux travaux moteurs représente une diminution d'énergie potentielle, dans l'eau de condensation. — Quant à la masse d'eau froide qui détermine la condensation, elle 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 : la somme de ces deux quantités constitue l'accroissement total d'énergie de l'eau. — En écrivant que la quantité de chaleur perdue par la vapeur est égale à la quantité de chaleur gagnée par l'eau froide, on admet encore que, dans ce système de corps, il y a communication d'énergie d'un corps à un autre, mais conservation de l'énergie totale du système (*).

Le principe de la conservation de l'énergie doit être considéré comme aussi général que le principe de la conservation de la matière elle-même. Dans les phénomènes les plus divers, un corps matériel qui semble se détruire éprouve simplement une transformation de son état primitif : de même, une disparition apparente quelconque d'énergie n'est jamais qu'une transformation, qui la fait apparaître sous une forme différente de sa forme primitive.

409. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes chimiques. — Lorsque deux corps, mis en présence l'un de l'autre, arrivent à se combiner chimiquement, la réaction dégage une certaine quantité de chaleur.

On a vu (369), par exemple, que 1 kilogramme de charbon, en se combinant avec l'oxygène pour former de l'acide carbonique, dégage 7850 calories. Or cette quantité de chaleur correspond à une quantité de travail représentée, en kilogrammètres, par 7850×425 , ou 3 327 750. On doit donc admettre que le charbon et l'oxygène, quand ils étaient en présence sans se combiner, sollicités par les forces dues à leur affinité mutuelle, possédaient cette même énergie à l'état potentiel : le nombre précédent représente le travail qu'ont accompli ces forces, au moment de la combinaison. — De même, 1 kilogramme

(*) La quantité d'énergie échangée, pendant la condensation de 1 kilogramme de vapeur d'eau, correspond, comme on l'a vu (363), à une quantité de chaleur représentée par 357 grandes calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 357×425 , ou 228 225 kilogrammètres.

d'hydrogène, en se combinant avec l'oxygène, dégage environ 54 500 calories : le travail effectué au moment de la combustion est représenté par $54\,500 \times 425$, ou 14 662 500 kilogrammètres. — Dans tous les cas, le système des corps mis en présence éprouve, par le fait de la combinaison, une diminution d'énergie potentielle, et un accroissement égal d'énergie actuelle : l'énergie totale du système demeure constante, si la chaleur dégagée par la réaction est employée uniquement à échauffer les produits de la réaction.

Inversement, pour effectuer la décomposition d'un composé chimique, il faut, en général, lui fournir une quantité de chaleur égale à celle que ses éléments auront dégagée au moment de leur combinaison. C'est ce que l'expérience a pu vérifier, dans certains cas particuliers. — 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 (*).

On doit donc considérer les phénomènes chimiques comme soumis, aussi bien que tous les autres phénomènes, au principe de la conservation de l'énergie.

410. — 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 en équilibre, il ne peut pas passer, de lui-même, de sa position actuelle à une position d'équilibre plus stable; mais si une cause extérieure vient à le déranger de son premier état, il peut alors tendre vers l'état le plus stable, correspondant 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 la position d'équilibre la plus stable, c'est-à-dire, que l'énergie potentielle diminuant le plus possible, les forces moléculaires accomplissent le tra-

(*) 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 la chaleur mise en liberté au moment de leur décomposition peut quelquefois 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.

vail 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.

41. Coefficient économique des machines thermiques. — Principe de Carnot. — On donne le nom général de *machines thermiques*, aux machines 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.

Les remarques suivantes montrent que la machine à vapeur n'utilise pas, sous forme de travail, la *totalité* de la chaleur empruntée à la chaudière. — Considérons une machine à vapeur, munie d'un condenseur, et fonctionnant d'une manière régulière. La chaudière reste à une température constante, sous l'influence de la chaleur qu'elle emprunte au foyer, et de la chaleur qu'elle cède à la vapeur. Le condenseur reste également à une température constante, sous l'influence de la chaleur dégagée par la vapeur qui s'y condense, et de la chaleur absorbée par l'eau froide qui s'y renouvelle incessamment. — Or, c'est dans le condenseur que la chaudière puise son eau d'alimentation; on peut donc se représenter, de la manière suivante, la succession des phénomènes. Une quantité déterminée d'eau, prise à la température du condenseur, vient emprunter à la chaudière, que nous appellerons la *source chaude*, la quantité de chaleur 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 lui abandonne le reste de la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière, puisqu'elle se retrouve à l'état liquide et dans les conditions initiales de température. On peut supposer que ce soit cette eau elle-même qui retourne ensuite à la chaudière, et qui continue à donner lieu à la même série de phénomènes. — Mais, pendant cette suite continue et périodique de transformations, il y a toujours perte, *au point de vue utile*, d'une partie de la chaleur empruntée à la chaudière. Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que, pendant la marche de la machine, le condenseur reçoit continuellement de l'eau à la température extérieure, et qu'une partie de cette eau est évacuée au dehors à une température plus élevée, celle du condenseur lui-même. La chaleur absorbée par cette eau est donc perdue pour le travail de la machine.

On appelle *coefficient économique* d'une machine déterminée, le rapport de la quantité de chaleur transformée en travail, à la quantité totale de chaleur fournie.

La théorie montre que, si la machine était absolument 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 tem-

pératures comptées à partir d'un *zéro absolu*, qui serait situé, dans le thermomètre à air, à 273 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.

42. Coefficient économique réel ou rendement des machines à vapeur. — 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. — Pour une machine déterminée, on appelle *coefficient économique réel*, ou *rendement*, le rapport entre la quantité de chaleur qui correspond au travail réellement utilisé, et la quantité totale de chaleur fournie. — Quelque soignée que soit la construction de la machine, l'expérience montre que ce rapport est toujours beaucoup inférieur au coefficient économique théorique.

Considérons, par exemple, une machine à vapeur, fonctionnant à une pression de 5 atmosphères, et où la température du condenseur serait maintenue à 40° centigrades. On sait que, à 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 T' du condenseur (source froide), comptée à partir du zéro absolu, est 40 + 273, ou 313. Le coefficient économique théorique de cette machine, calculé comme il vient d'être dit (41), serait donc : $1 - \frac{313}{426} = 0,26$, c'est-à-dire que, théoriquement, le travail produit

par la machine devrait représenter $\frac{1}{4}$ environ 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 $\frac{1}{5}$, ou quelquefois $\frac{1}{4}$.

413. — Bien que le coefficient économique réel soit toujours notablement inférieur au coefficient théorique, l'expérience montre qu'il *augmente*, comme le coefficient théorique, à mesure que l'on considère des machines fonctionnant à des températures plus élevées. — Aussi, est-ce dans ce sens que l'industrie

(*) On est conduit à la considération du *zéro absolu* par l'emploi du thermomètre normal (212). Dans un pareil instrument, le degré de température est défini par une variation de force élastique du gaz, dont la valeur est $\frac{1}{273}$ 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 273 degrés, au-dessous du zéro ordinaire, la force élastique de l'air devrait avoir diminué des $\frac{273}{273}$ 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, $T = 273 + t$.

tend chaque jour à perfectionner la construction des machines à vapeur.

La principale difficulté que l'on rencontre, dans cette voie, consiste dans l'accroissement rapide de la force élastique de la vapeur d'eau avec la température (289) : on arriverait à atteindre des pressions dangereuses pour la sécurité. — On a cherché, depuis quelques années, 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 cette élévation de température, que comme augmenterait la pression d'un gaz dans les mêmes conditions. On peut ainsi accroître beaucoup la température T, sans arriver à des pressions trop considérables, et le coefficient économique acquiert une valeur beaucoup plus grande.

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.

414. 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 l'énergie dépensée dans 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 résistant*, 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 M. 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*,

(*) D'après M. Helmholtz, quand un homme gravit une montagne, le travail résistant de son propre poids est égal à la cinquième partie du travail mécanique correspondant à la combustion respiratoire effectuée pendant le même temps. En d'autres termes, le coefficient économique de la machine humaine (411) est $\frac{1}{5}$. Cette machine présente donc une perfection remarquable, eu égard aux limites étroites de température entre lesquelles elle fonctionne (415).

correspond l'apparition d'une énergie calorifique moindre pendant le mouvement que pendant le repos; la différence représente évidemment l'énergie mécanique qui correspond au travail effectué (*).

C'est donc le travail des affinités chimiques, c'est-à-dire l'énergie rendue disponible par la combustion respiratoire, 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. »

415. 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 à l'accomplissement du travail de séparation 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 faut remarquer cependant que, là encore, il n'y a qu'une simple transformation d'énergie. Les éléments chimiques de la plante, séparés de l'oxygène auquel ils étaient primitivement combinés, ont acquis, par cela même, un accroissement d'énergie *potentielle*, qui reparaitra à l'état d'énergie actuelle, le jour où ces éléments se combineront de nouveau avec l'oxygène, c'est-à-dire le jour où ils éprouveront une combustion les ramenant à l'état d'eau et d'acide carbonique.

(*) 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 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 pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure.

416. **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 (414). Or, un grand nombre 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 (415). — 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, reparait 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 continuels 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

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

1. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

417. **Électrisation des corps par le frottement.** — On sait, depuis une époque fort reculée, que l'ambre jaune ou succin (*ήλεκτρον*), lorsqu'on le frotte, acquiert la propriété d'attirer les corps légers, tels que les barbes de plume, ou les petits fragments de papier; cette propriété fut attribuée à une cause spéciale, qui prit le nom d'*électricité*.

En 1550, Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le soufre, le verre; toutes ces substances s'*électrisent* quand on les frotte, c'est-à-dire qu'elles deviennent capables d'attirer les corps légers. — D'autres substances, comme les métaux, le liège, le bois, tenues à la main et frottées, ne paraissaient pas s'*électriser*: nous allons voir que ces exceptions ne sont qu'apparentes.

418. **Corps conducteurs de l'électricité.** — Au commencement du dix-huitième siècle, le physicien anglais Gray fut conduit à envisager les phénomènes à un point de vue tout nouveau. — Ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon, il constata que le verre communiquait au bouchon la propriété d'attirer les corps légers. Il planta alors dans le bouchon une tige de sapin, terminée par une boule d'ivoire : en recommençant l'expérience, il vit également la boule d'ivoire s'*électriser*. Enfin, en suspendant à la tige de sapin une longue corde de chanvre terminée par une boule métallique, il vit encore cette boule acquérir la même propriété. — Tout se passait donc, dans ces expériences, comme si l'électricité était due à une sorte de fluide, que le frottement aurait fait apparaître, et qui se serait ensuite répandu dans