

La chaleur fournie pendant la fusion est donc employée presque tout entière à l'accomplissement d'un *travail intérieur*, surmontant les actions moléculaires, et amenant les molécules dans des positions relatives différentes de celles qu'elles avaient à l'état solide, à la même température. La liquéfaction devient complète, lorsque la quantité de chaleur absorbée est telle, que ce travail ait pu être effectué pour tous les points de la masse. — 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*.

406. 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 la somme des forces vives moléculaires n'est pas modifiée.

Quant au *travail extérieur*, il n'est pas négligeable comme il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. L'accomplissement de 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 l'accomplissement d'un *travail intérieur*, surmontant les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide, et amenant les molécules 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 $\frac{1}{13}$ 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 (*).

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 positif, tantôt négatif : 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 (275).

(*) 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 effectué par 1 kilogramme d'eau, pendant la vaporisation, il

III. — CONSERVATION ET TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

407. Énergie actuelle, énergie potentielle, énergie totale. — Dans les divers phénomènes que nous venons de passer en revue, on a pu constater que les divers effets, produits par l'addition d'une certaine quantité de chaleur à un corps quelconque, se réduisent toujours à trois effets distincts : production d'un *travail extérieur*, production d'un *travail intérieur*, et *accroissement de force vive des molécules* (chaleur sensible). — 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*. Cette locution, introduite dans l'exposé des phénomènes mécaniques ou calorifiques, permet de les présenter d'une manière très générale. — Mais l'énergie doit alors être envisagée sous deux points de vue différents, comme nous allons le montrer d'abord sur un exemple emprunté à la chute des corps.

Supposons qu'un corps, du poids de 4 kilogrammes, ait été amené à une hauteur de 60 mètres au-dessus du sol. Il aura fallu, pour cela, fournir une quantité de travail représentée par 4×60 , ou 240 kilogrammètres. Ce travail dépensé doit être considéré comme ayant communiqué au corps une *énergie*, qui pourra se manifester, soit par la force vive de translation que ce corps pourra acquérir en tombant de la même hauteur, soit par la quantité de chaleur qui apparaîtra si le corps est arrêté brusquement au bas de sa chute, soit enfin par la quantité de travail qu'il sera capable de produire par sa chute même. — Nous avons montré que ces diverses manifestations sont équivalentes entre elles.

Or, reprenons maintenant ce même corps, amené à une hauteur de 60 mètres, et considérons l'instant où, pendant sa chute, il a parcouru seulement un espace de 40 mètres. Le travail effectué par son poids est seulement 4×40 ou 160 kilogrammètres; si l'on désigne par v sa vitesse à cet instant, la force vive $\frac{1}{2}mv^2$, qui représente la quantité d'énergie manifestée par la vitesse acquise, est seulement l'équivalent de

suffit de multiplier la pression p sur l'unité de surface, savoir 10555 kilogrammes, par l' accroissement de volume u exprimé en mètres cubes, savoir $1^m,699$; on trouve 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, 537 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*, employé pour vaincre les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide.

160 kilogrammètres : c'est ce qu'on exprime en disant que l'énergie actuelle, à cet instant, est 160. — Mais le corps peut encore tomber de 20 mètres; son poids peut encore fournir un travail représenté par 4×20 , ou 80 kilogrammètres. On doit donc considérer le corps, à l'instant dont il s'agit, comme possédant encore, en puissance, une énergie mesurée par 80; c'est ce qu'on nomme l'énergie potentielle. — En général, à un moment quelconque de la chute, la somme de l'énergie actuelle et de l'énergie potentielle est toujours égale à l'énergie totale, correspondante à la hauteur où le corps avait été primitivement amené.

En appliquant à tous les phénomènes de mouvement les expressions que nous venons de définir, 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 de ses points les uns par rapport aux autres; *énergie potentielle*, le travail qui peut se produire, ou la force vive qui peut prendre naissance, si ce corps passe de son état actuel à un état différent, sous l'action des forces qui le sollicitent; *énergie totale*, la somme des deux quantités ainsi définies.

408. 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. — L'expérience montre que 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, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (405) : 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, 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 (*).

409. Considérons de même 1 kilogramme de vapeur d'eau à 100°, 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. — L'expérience montre que 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, accompli par la pression de l'atmosphère, au moment de la diminution considérable du volume primitivement occupé par la vapeur; 2° au travail intérieur, accompli par les actions moléculaires de l'eau, dans son retour à l'état liquide. La somme de ces deux travaux 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.

410. Transformation 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, en général, une certaine quantité de chaleur. C'est à ce genre de phénomènes, et particulièrement aux phénomènes d'oxydation, que nous empruntons la plupart de nos sources artificielles de chaleur.

(*) La quantité d'énergie échangée, pour la fusion de 1 kilogramme de glace, correspond, comme on l'a vu (359), à une quantité de chaleur représentée par 79 calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 79×425 , ou 33 575 kilogrammètres.

(**) La quantité d'énergie échangée, pendant la condensation de 1 kilogramme de vapeur d'eau, correspond, comme on l'a vu (367), à une quantité de chaleur représentée par 537 calories. Elle correspond donc à une quantité de travail représentée par 537×425 , ou 228 225 kilogrammètres.

On a vu (569), 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 d'hydrogène, en se combinant avec l'oxygène, dégage environ 34 500 calories : le travail effectué au moment de la combustion est représenté par $34\,500 \times 425$, ou 14 662 500 kilogrammètres. — Dans tous ces 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.

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*.

411. Coefficient économique théorique des machines thermiques, en général. — 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

(*) 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.

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*, pour une machine déterminée, le rapport de la quantité de chaleur transformée en travail, à la quantité totale de chaleur fournie.

412. Principe de Carnot. — La théorie montre que, si la machine était absolument parfaite quant à sa construction, 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 273 degrés au-dessous de la glace fondante (*).

(*) On est conduit à la considération du *zéro absolu* par l'emploi du thermomètre à air, disposé de façon que le volume du gaz demeure constant et que les variations

Cette règle, énoncée par Sadi Carnot en 1824, pour obtenir la valeur *théorique* du coefficient économique, est connue 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.

413. Coefficient économique réel des machines à vapeur ou à gaz. — 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, au point de vue utile, autant de causes de déperdition d'énergie, qu'il est impossible de supprimer complètement. — Pour une machine déterminée, on appelle *coefficient économique réel*, le rapport entre la quantité de chaleur qui correspond au travail réellement utilisé, et la quantité totale de chaleur fournie. — Quelle 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 155° centigrades; la température T de la chaudière (source chaude), comptée à partir du zéro absolu, est donc $155 + 273$, 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 (413), serait donc

$$1 - \frac{313}{426} = 0,26,$$

de température se traduisent par des variations de force élastique (262). — Dans un pareil instrument, on constate que chaque élévation de température de 1 degré, entre la température de la glace fondante et celle de la vapeur d'eau bouillante, correspond à un accroissement de force élastique du gaz, dont la valeur est $\frac{1}{273}$ de la force élastique à la température de la glace fondante. C'est cette variation de force élastique qui a été adoptée, par les physiiciens, comme définition précise du degré. — 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 définition du *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, $T = 273 + t$.

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 $\frac{1}{7}$.

414. 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 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 (295) : 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 force élastique 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. — Les principaux inconvénients, qui se sont opposés jusqu'ici à leur emploi pour des travaux continus, sont, d'une part, la cherté du combustible, qui est généralement le gaz d'éclairage; d'autre part, l'usure rapide de ces machines, et les irrégularités qu'elles présentent parfois dans leur action.

415. 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*, une partie de l'énergie développée par les affinités 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. — M. Hirn prit pour mesure de l'énergie mise en jeu dans la combustion respiratoire, chez l'homme, la quantité d'oxygène consommée. Il plaçait dans une petite chambre, disposée de manière à permettre le renouvellement de l'air et le dosage des gaz, un homme qui devait exécuter les deux prescriptions suivantes : 1° garder, pendant un certain temps, un repos absolu; 2° exécuter ensuite, pendant le même temps, un mouvement d'ascension, sur des palettes placées à la circonférence d'une roue qui se dérobait sous lui à mesure qu'il la gravissait. Dans ce mouvement, l'homme effectuait ainsi, à chaque pas, un *travail*, représenté par l'élévation de son propre poids à une certaine hauteur. — On trouva 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 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 : sans cette énergie, quelque parfaite que soit la machine,

(*) 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'énergie calorifique, est supérieure à la valeur qu'elle a pendant le repos. — C'est en effet ce que montrent les expériences de mesure.

quelque puissante que soit la volonté de ceux qui doivent la conduire, le navire resterait inerte. »

416. **Coefficient économique de la machine humaine.** — La machine humaine pouvant être assimilée à une machine thermique, on peut se proposer de déterminer son *coefficient économique pratique*, c'est-à-dire le rapport de l'énergie utilisée dans le travail qu'elle effectue, à l'énergie développée par les combustions qui s'y produisent. Voici le résultat de ce calcul, tel qu'il a été présenté par M. Helmholtz.

Un homme, en gravissant une montagne, peut élever son propre poids, en une heure, d'une hauteur verticale de 540 mètres environ. La combustion respiratoire, dans ce cas, correspond à un travail à peu près égal au produit de ce poids par 5 fois 540 mètres. Il en résulte que, dans ces circonstances, le coefficient économique est égal à $\frac{1}{5}$ environ. — La machine humaine apparaît ainsi comme présentant une perfection remarquable, surtout si l'on réfléchit aux faibles différences de température que présentent ses divers points, c'est-à-dire aux limites étroites de température entre lesquelles elle fonctionne (414).

417. **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 assimilées par les 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 des éléments chimiques qui le constituent, malgré les forces d'affinité qui sollicitaient ces éléments à rester combinés. — Cette source d'énergie n'est autre que le Soleil. La force vive du mouvement vibratoire qui constitue les radiations solaires, et qui parvient à la plante sous forme d'énergie calorifique et lumineuse, est utilisée par elle, pour effectuer la séparation des éléments de l'acide carbonique, de l'eau, ou d'autres substances plus ou moins complexes.

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.

418. **La chaleur solaire est la source de tout mouvement à la surface de la Terre.** — L'ensemble des considérations qui précé-

dent, et dont Robert Mayer a fait ressortir la valeur, conduit à envisager la chaleur solaire comme la source de toute énergie à la surface de notre globe : tous les mouvements effectués, soit par les êtres animés, soit par les corps inanimés, apparaissent comme des manifestations de la force vive des radiations solaires.

L'animal trouve, dans la combustion des matériaux de ses aliments, l'énergie nécessaire à ses mouvements (415). 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 (417). — 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. — Il en est de même des machines dans lesquelles le combustible employé est le coke, le gaz d'éclairage, les diverses huiles hydrocarbonées, etc.

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

I. — PRINCIPES FONDAMENTAUX.

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

A la fin du seizième siècle, on reconnut la même propriété dans un grand nombre d'autres corps, comme la résine, le soufre, le verre, et toutes les matières vitrifiées ; toutes ces substances s'*électrisent* quand on les frotte, c'est-à-dire qu'elles deviennent, comme le succin, capables d'attirer les corps légers.

Cependant ces expériences, faites par Gilbert, médecin de la reine Élisabeth d'Angleterre, et répétées par divers savants, semblèrent exclure de la liste des substances électrisables, certains corps, et en particulier les métaux : en effet, une tige métallique, tenue à la main et frottée, ne manifeste aucun signe d'électricité. — Nous allons voir que ces exceptions ne sont qu'apparentes, et qu'on peut constater dans tous les corps le développement d'électricité par le frottement, à la condition de se placer dans des conditions convenables.