

De l'application de la loi de la conservation de la force à la nature organique

Hermann v. Helmholtz

[565] Le progrès le plus important par lequel les sciences de la nature de notre siècle se sont illustrées, a été la découverte d'une loi générale qui embrasse et régit toutes les branches de la physique et de la chimie. Cette loi est d'une importance capitale aussi bien pour les spéculations les plus audacieuses sur la nature des forces, que pour les questions tout à fait pratiques concernant la construction de machines. Elle est présentement connue sous l'appellation de « principe de la conservation de la force ». Il serait peut-être préférable, comme le suggère M. Rankine, de la désigner sous le nom de « principe de la conservation de l'énergie », car elle ne se rapporte pas à ce que nous désignons communément par *intensité* de la force. La loi n'implique pas que l'intensité des forces naturelles demeure constante. Par contre, elle se réfère avant tout à la quantité totale de pouvoir résultant de n'importe quel processus naturel qui permet d'effectuer une certaine quantité de travail.

Si nous appliquons cette loi, par exemple, à la gravitation, cela n'implique pas que l'intensité de la gravité de quelque corps que ce soit demeure inchangée si celui-ci est amené à la même distance qui le sépare du centre de la terre (ce qui est pourtant strictement et indubitablement vrai). Ou encore, et concernant les autres forces élémentaires, par exemple la force chimique : lorsque deux éléments se combinent et par là suscitent une influence réciproque, soit à distance, soit par contact immédiat, ils vont toujours exercer la même force l'un sur l'autre — la même force tant en termes d'intensité [566] qu'en termes de direction et

de quantité. Cette seconde loi est vraie aussi. Mais elle diffère du principe de la conservation de la force. Nous pourrions exprimer le sens de la loi de la conservation de l'énergie en affirmant que chaque force naturelle épuise et perd le pouvoir de causer la même altération une seconde fois. Mais alors que par chaque altération naturelle, la force qui en a été la cause se dépense, il y a toujours une autre force dont le pouvoir de produire d'autres altérations croît, l'augmentation étant équivalente à la dépense de pouvoir de la première force. Ainsi, bien qu'il appartienne à la nature de chaque force inorganique de s'épuiser par sa propre action, la puissance de l'ensemble du système dans lequel se produit l'altération n'est ni épuisée, ni augmentée en quantité, mais seulement modifiée dans sa forme. Quelques exemples particuliers vous permettront de mieux saisir cette loi que n'importe quelle théorie générale.

Commençons par la force de gravitation, cette force universelle, qui non seulement exerce une influence sur l'univers entier, mais confère aussi à beaucoup de machines le moyen de fonctionner. Nombre de montres et de petites machines sont souvent maintenues en mouvement par un poids. La même chose vaut pour les moulins à eau : c'est la chute d'eau qui les actionne. Vous savez que chaque machine est susceptible d'être mise en mouvement par un moulin à eau, ou par un poids suspendu, et que par cette puissance motrice, on peut gagner n'importe quel travail qu'une machine est réellement capable de produire. Vous comprendrez par conséquent que la lourdeur d'un corps solide ou liquide qui évolue d'un point élevé vers un point moins élevé, correspond à une force motrice et peut produire n'importe quel travail mécanique. Dès que le poids atteint la surface de la terre, il possède la même quantité, la même intensité de gravité. Mais son pouvoir moteur (ou sa puissance de travail) est épuisé. Il faut le soulever une seconde fois avant qu'il ne recommence à produire du travail. J'affirme donc dans ce sens que la faculté de produire du surplus de travail est épuisée – elle s'est perdue. Et ceci est vrai de toute force naturelle quand son pouvoir a été la cause d'une altération. Il s'ensuit que la faculté de créer et d'effectuer du travail ne dépend pas de l'intensité de la gravité. Celle-ci peut demeurer constante, le poids peut se situer à un point supérieur [567] ou à un point inférieur, tandis que le pouvoir de travail est susceptible de varier grandement. Le pouvoir de travail d'un poids (ou la quantité de travail créée par un poids) est mesuré par le produit de la hauteur d'élévation du poids et du poids même. C'est pourquoi notre mesure commune est celle du pied-livre, c'est-à-dire le produit du nombre de pieds multiplié par le nombre de livres.

Or, nous pouvons soulever un poids par la force d'un autre poids élevé ; l'eau se déversant sur un moulin à eau et soulevant le poids d'un

marteau en est un exemple. On peut donc démontrer que le travail du marteau soulevé exprimé en pieds-livres, c'est-à-dire, le poids du marteau multiplié par la hauteur exprimée par le nombre de pieds correspondant à la hauteur d'élévation, n'excède pas le produit du poids de l'eau se déversant d'une certaine hauteur. Or, nous connaissons également une autre forme de force motrice, de force motrice mécanique, – la vitesse. Dans ce sens, la vitesse de tout corps pouvant créer du travail, est nommée *vis viva*, ou force vive de ce corps. Vous en trouverez beaucoup d'exemples. Prenons celui d'un boulet de canon. Au moment du tir, il possède une grande vitesse, une immense force de destruction ; quand sa vitesse est fortement réduite, il n'est plus qu'une chose assez inoffensive. Sa puissance ne dépend que de la vitesse. Dans le même sens, la vitesse du vent est une force motrice, car elle imprime le mouvement de rotation aux moulins à vent, et à travers le mécanisme de ceux-ci, elle crée une grande variété de travaux mécaniques. Vous comprenez donc que la vitesse est en soi une force motrice.

Prenez l'exemple d'un pendule oscillant. Quand on le soulève latéralement, le poids ainsi élevé se situe un peu en-dessus du point de repos en position parfaitement perpendiculaire. Vous le lâchez, il s'approche de la position d'équilibre, il a acquis une certaine vitesse. C'est dire que vous avez d'abord obtenu une puissance motrice par l'élévation du poids. Mais lorsque le pendule atteint sa position d'équilibre, une puissance motrice sous forme de *vis viva*, de vitesse, lui est imprimée, et il se meut sur sa trajectoire vers l'autre côté, s'élève jusqu'au point où la vitesse est épuisée – alors la *vis viva* ou vitesse se transforme en poids élevé. On comprendra que, pour chaque pendule, la puissance du poids élevé se transforme en vitesse, [568] et celle-ci en puissance de poids élevé. Les deux sont équivalentes.

Considérez encore l'élasticité d'un ressort tendu. Il est capable de créer du travail, puisqu'il fait marcher des machines ou des montres. L'arbalète comporte aussi de tels ressorts. Les ressorts de montre et d'arbalète sont tendus par la force du bras humain, et c'est ainsi qu'ils deviennent des réservoirs de pouvoir mécanique. Ce pouvoir, qui leur est communiqué par la force du bras, est dépensé le lendemain par la montre. Il l'est par degrés, afin que le frottement des roues soit vaincue. Par contre, ce pouvoir est dépensé d'un seul coup par l'arbalète. A l'instant du tir, toute la quantité de force imprimée au ressort est alors communiquée à la flèche qui acquiert une puissante *vis viva*.

L'élasticité de l'air peut être une force motrice au même titre que celle des corps solides. A l'état comprimé, l'air peut imprimer un mouvement à d'autres corps. Prenons l'exemple du fusil à air comprimé, qui est tout

à fait analogue à celui de l'arbalète. L'air se comprime sous l'effet de la force du bras humain et devient un réservoir de force mécanique. A l'instant du tir, la force est communiquée à la balle sous forme de *vis viva* ; celle-ci possède par la suite la même force mécanique que celle imprimée à la balle d'un fusil dont la charge se compose de poudre explosive.

Quant à l'élasticité des gaz comprimés, elle se révèle être la force motrice la plus puissante de toutes nos machines — la machine à vapeur. Mais le cas de celle-ci se présente sous un aspect différent, étant donné que c'est la vapeur comprimée qui la fait marcher. Or la vapeur n'a pas été comprimée par le bras humain comme dans le cas du fusil à air comprimé. La compression se produit sans médiateur à l'intérieur du chaudron grâce à la chaleur communiquée à celui-ci par le combustible.

Vous voyez donc que la chaleur s'est substituée à la force du bras humain. L'exemple de la machine à vapeur nous apprend que la chaleur est, elle aussi, une force motrice. Cet aspect de notre sujet, à savoir l'équivalence de la chaleur en tant que force motrice, d'une part, et de la force mécanique, d'autre part, recouvre le domaine qui a attiré la plus grande attention et a suscité des recherches très approfondies.

[569] On tient aujourd'hui pour acquis que, si la chaleur est productrice de force mécanique, c'est-à-dire de travail mécanique, une certaine quantité en est cependant toujours perdue. D'autre part, on arrive aussi à produire de la chaleur par une force mécanique, soit par frottement, soit par le choc de corps non-élastiques. On peut chauffer un morceau de fer à une haute température, au point qu'il devienne incandescent et lumineux, en le battant continuellement au marteau. Par contre, quand la force mécanique est créée par la chaleur, nous observons qu'une partie de celle-ci est toujours perdue. La perte est proportionnelle à la quantité de travail mécanique produite par la chaleur. Nous mesurons le travail mécanique en pieds-livres, et la quantité de chaleur est mesurée par la quantité calorifique nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'une livre d'eau. L'équivalent de la chaleur a été défini par M. Joule, de Manchester. Il a découvert qu'une unité de chaleur, ou la quantité de chaleur mécanique nécessaire à élever d'un degré C la température d'une livre d'eau, était équivalente au travail mécanique nécessaire à élever la même masse d'eau à 423,5 mètres ou à 1389 pieds anglais. Ceci est l'équivalent mécanique de la chaleur.

Ainsi, si nous produisons autant de chaleur pour qu'une livre d'eau se réchauffe d'un degré C, nous devons dépenser une quantité de travail mécanique égale à l'élévation d'une livre d'eau à 1389 pieds anglais, et nous devons la perdre pour obtenir la quantité équivalente de chaleur.

Ces considérations apportent la preuve que la chaleur n'est pas une matière pondérable. Elle doit être une force motrice, parce qu'elle est convertie soit en mouvement, soit en force mécanique, et qu'elle est créée soit par un mouvement, soit par une force mécanique. Nous constatons pour la machine à vapeur que la chaleur est la source de la force motrice, mais cette chaleur étant alimentée par des matières combustibles, il faut chercher dans celles-ci l'origine de cette force, c'est-à-dire dans les forces chimiques du combustible et dans l'oxygène avec lequel il se combine.

Vous en tirerez la conclusion que les forces chimiques sont capables de produire du travail mécanique, et qu'elles sont mesurées par les mêmes unités de mesure valables que n'importe quelle force mécanique. Nous considérons les forces chimiques comme des forces attractives — dans notre cas, comme [570] une force d'attraction que le carbone du combustible exerce sur l'oxygène de l'air. Et si la force attractive unit les deux substances, il en résulte du travail mécanique, de la même façon que le globe terrestre crée du travail par l'attraction d'un corps pesant. Or, la conservation de la force — de la force chimique — est d'une importance majeure pour le sujet que nous abordons aujourd'hui. Nous pouvons donner à la conservation de la force l'expression suivante : soit une quantité donnée de substances chimiques que l'on fait passer d'un état à une autre (ou inversement), de sorte que la quantité de ces substances au début de ce processus demeure équivalente à celle que l'on trouve à la fin de ce processus, alors la quantité de travail — de travail mécanique ou de son équivalent — créée dans ce processus est toujours la même. Ce processus ne peut produire ni plus, ni moins de travail. Aucun travail mécanique au sens ordinaire du terme n'est obtenu par une force chimique, car cette dernière ne produit que de la chaleur. Il s'ensuit que la quantité de chaleur causée par un processus chimique ne dépend aucunement de la manière dont il se déroule. Le déroulement est, quant à lui, déterminé par la volonté de l'expérimentateur.

Nous voyons ainsi que l'énergie de chacune des forces de la nature est mesurable par la même unité (pied-livre), et que l'énergie de l'ensemble du système de corps soustrait à toute influence d'un corps qui lui est extérieur, doit demeurer constante : elle ne peut ni diminuer, ni augmenter sous l'effet d'une quelconque modification. L'univers entier représente un tel système de corps doués de forces ou d'énergies de toute sortes. Nous tirons des faits que je vous ai exposés la conclusion que la quantité de pouvoir de travail, ou d'énergie, dans le système entier demeure strictement et inaltérablement constante, et ceci par delà toutes les modifications qui s'y produisent. Si nous nous rallions à l'hypothèse de Laplace, qui affirme que l'univers était composé à l'origine d'un chaos

de matière nébuleuse dispersée à travers les espaces infinis, nous devons en conclure qu'à cette époque, la seule forme d'énergie existant dans ce système était la force attractive due à la gravitation, c'est-à-dire le même genre d'énergie que celui que possède un poids élevé. Les astronomes pensent que, par la suite, cette matière nébuleuse a congloméré pour former des masses solides. Ces masses provenant en grande quantité peut-être d'endroits lointains, sont entrées en collision, ce qui [571] a causé une perte de leur force attractive, ou d'énergie d'attraction, d'où la nécessité d'une poussée de la température. Les faits connus nous permettent de calculer avec suffisamment de précision la quantité de cette chaleur, c'est-à-dire la quantité totale de température qui a dû être produite au cours de ce processus de conglomération. Cette quantité est immensément grande, à telle enseigne d'ailleurs qu'elle dépasse toutes nos représentations et toutes les limites de notre imagination. Si nous la calculons et que nous supposons que le soleil contenait à cette époque toute la chaleur et qu'il avait la même température spécifique que l'eau, sa température aurait atteint 28 millions de degré; il aurait donc possédé une température dépassant toutes celles que nous connaissons sur notre terre. Mais cette chaleur-là n'a jamais pu être atteinte dans le soleil, car une partie de la chaleur crée par l'agrégation des masses s'est répandue par radiation dans l'espace. Je mentionne le résultat de ces calculs dans le seul but de vous démontrer qu'une grande quantité de chaleur a pu être créée de cette manière. Le même processus se produit avec les étoiles filantes et les météores qui atteignent la terre en provenance de l'espace planétaire. Leur vitesse est détruite par le frottement de l'air et par le choc sur la surface de la terre, et nous les voyons devenir lumineux. Si nous en trouvons sur terre, ils sont chauds.

Dans son état présent, le soleil est plus chaud que n'importe quel corps chauffé sur le globe terrestre. La démonstration en a été faite à travers les expériences les plus récentes des professeurs Kirchhoff et Bunsen, de Heidelberg, qui portent sur le spectre lumineux du soleil, et par lesquelles la preuve a été fournie que l'atmosphère du soleil contient du fer et d'autres métaux à l'état gazeux — un état qu'aucune température sur terre ne pourrait produire.

Notre planète contient beaucoup d'énergie sous forme de température interne. Cette partie de son énergie est la cause des phénomènes volcaniques. Mais elle n'a pas d'effet notable sur les phénomènes à la surface du globe, étant donné qu'une petite quantité seulement de cette chaleur s'y manifeste. On a calculé que la quantité de chaleur s'échappant de l'intérieur vers la surface du globe ne peut élever la température que d'un treizième de degré.

[572] Nous connaissons une autre force qui crée du mouvement à la surface du globe. Je pense à la force attractive du soleil et de la lune en tant que cause des marées.

Tous les autres phénomènes sur terre sont dus à la radiation provenant du soleil, aux rayons de soleil, et la plupart des modifications qui surviennent sur notre globe sont créées par la chaleur solaire. Celle-ci étant inégalement distribuée à la surface, certaines parties de l'atmosphère possèdent une température plus élevée que d'autres. Les parties plus chaudes s'élèvent, ce qui produit les vents et vapeurs. Ils descendent sous forme de nuage d'abord, et ensuite de précipitation mouillant la surface, et sont enfin rassemblés en rivières se déversant dans la mer. Vous comprenez ainsi que tous les phénomènes météorologiques de notre globe sont créés par la chaleur du soleil.

La lumière solaire est à l'origine d'une autre série de phénomènes, dont le produit principal se révèle être la végétation. Car les plantes ne croissent que grâce à la lumière du soleil : elles produisent les matières combustibles déposées dans les corps végétaux, qui sont extraites de l'atmosphère et des sols sous forme d'acide carbonique et d'eau.

Ceci vous donne un idée de la signification et de la portée du principe général dont je me suis proposé de parler. Etant donné que beaucoup d'hommes de science anglais se sont penchés sur l'élaboration des conséquences de ce principe très important pour la théorie de la chaleur, pour l'énergie du système solaire et pour la construction de machines, les résultats de ces recherches vous seront mieux explicités par vos compatriotes. C'est pourquoi je n'aborderai pas cet aspect de notre sujet. Ainsi, M. Grove a démontré que chaque force naturelle est capable de modifier toute autre force, et M. Joule, de Manchester, a commencé à déterminer la valeur de l'équivalent de la chaleur et à en prouver sa constance, et ceci sous l'enseigne d'intérêts plus pratiques du génie mécanique.

Le premier exposé du principe général a été publié en 1842 en Allemagne par [573] M. Mayer, de Heilbronn. En tant que médecin, il avait pris un grand intérêt à la solution de problèmes physiologiques. C'est lui qui, guidé par une question de physiologie, a le premier découvert le principe de la conservation de la force. A la même époque, j'ai entamé des recherches sur le même sujet, que j'ai publiées un peu après celles de M. Mayer en 1847. Il peut paraître insolite et curieux même que certains physiologistes aient pu découvrir une telle loi, car il semblerait plus naturel que des représentants des sciences physico-chimiques ou des ingénieurs en fassent la découverte, comme cela a été le cas en Angleterre. Il existe pourtant des liens étroits entre les problèmes fondamentaux auxquels l'art de l'ingénieur et la physiologie sont confrontés,

d'une part, et la conservation de la force, d'autre part. Pour imprimer un mouvement à une machine, on a toujours besoin d'une force motrice provenant de l'eau, d'un combustible ou d'une matière animale vivante. Les constructeurs de machines, d'instruments ou de montres du siècle passé, qui ne connaissaient pas la conservation de la force, se sont engagés dans la tentative de maintenir en marche une machine sans dépense de force motrice. Beaucoup ont travaillé longtemps et très assidûment au développement d'une telle machine capable de fournir un mouvement perpétuel et de créer n'importe quel travail. Ils ont désigné une telle machine sous le nom de *perpetuum mobile*, et ils croyaient en avoir trouvé un exemple dans chaque corps animé, qui leur semblait produire la force motrice sans relâche et sans l'apport d'une quelconque force mécanique extérieure. Ils ne se sont pas rendus compte que l'action de manger pouvait être liée à la production de force mécanique, car il croyaient que la nourriture n'était nécessaire qu'à la réparation de petits dommages à l'intérieur de la machine ou à la réduction du frottement, de même que la graisse favorise la rotation de l'axe dans l'essieu. Or, la découverte de ce que l'on nomme le principe de la conservation de la *vis viva* par des mathématiciens du siècle passé a permis de démontrer que la construction d'un *perpetuum mobile* entretenu par des forces mécaniques pures, était chose impossible. Mais on n'avait pas acquis la certitude que cela fût impossible par interposition de chaleur, d'électricité ou d'une force chimique. Enfin, la loi générale de la conservation de la force a été découverte, formulée et prouvée. Elle démontre que même la connexion entre pouvoirs mécaniques et chaleur, électricité [574] ou force chimique ne permet pas de construire une telle machine en mouvement perpétuel et créant du travail à partir de rien.

Nous devons considérer les corps vivants du même point de vue et nous demander ce qu'il en est. Si vous comparez le corps animal avec une machine à vapeur, vous obtenez l'analogie la plus complète. Les animaux assimilent des matières nutritives composées de substances inflammables : la graisse, les matières nommées hydrocarbures (amidon et sucre), les substances nitrogènes, tels l'albumine, la viande, le fromage, et autres. Les organismes vivants consomment ces substances inflammables et l'oxygène de l'air (par voie de respiration). Si, au lieu de la graisse, de l'amidon et du sucre, vous prenez du charbon ou du bois, et l'oxygène contenu dans l'air, vous obtenez les matières combustibles des machines à vapeur. Les organismes vivants évacuent de l'acide carbonique et de l'eau. Et si nous négligeons ici les quantités minuscules de substances plus complexes qui sont trop petites pour entrer en ligne de compte, les organismes évacuent le nitrogène sous forme d'urée. Soit, par exemple,

un jour dans la vie d'un animal, que nous considérons un ou plusieurs jours plus tard. Supposons que le poids de cet animal demeure inchangé du premier au second jour, et que son corps soit composé de manière identique à l'un comme à l'autre jour. Pendant ce laps de temps, dans l'intervalle du premier au second jour, l'animal se nourrit, consomme de l'oxygène, et évacue de l'acide carbonique, de l'eau et de l'urée. Une certaine quantité de matière inflammable, de nourriture, s'est donc combinée avec de l'oxygène, et a produit presque les mêmes substances, les mêmes composés que ceux qui seraient produits si l'on brûlait de la nourriture (ou du moins de la graisse, du sucre, de l'amidon, etc.) dans un feu ouvert. Les substances qui ne contiennent pas d'azote se transformeraient en acide carbonique et en eau, comme si elle étaient brûlées par un corps vivant, sauf que l'oxidation prendrait plus de temps dans celui-ci. Et les substances albumineuses produiraient les mêmes composés ainsi que de l'azote — comme dans un feu ouvert. Pour rendre les deux cas égaux, supposons que la quantité d'urée créée par le corps animé se transforme sans développement significatif de température en carbonate d'ammoniaque, et que celui-ci soit brûlé; nous obtiendrions ainsi de l'azote, de l'eau et de l'acide carbonique. La quantité de chaleur dégagée [575] par la décomposition de l'urée en acide carbonique et en azote ne serait pas considérable, en comparaison de celle produite par la combustion de la matière grasse, du sucre et de l'amidon. Par conséquent, nous pouvons transformer une certaine quantité de matières nutritives en acide carbonique, eau et azote, soit en les brûlant dans un feu ouvert, soit en les faisant manger par des animaux vivants et en brûlant l'urée ensuite. Et nous obtenons le même résultat dans les deux cas.

J'ai dit que la conservation de la force appliquée aux processus chimiques impliquait qu'une quantité donnée de travail mécanique, ou de son équivalent, se créât au cours de ce processus, et que cette quantité demeurât constante quelles que soient les circonstances dans lesquelles ce processus se déroule. Nous devons en conclure que la quantité de travail créé ou la quantité de l'équivalent du travail mécanique, est égale à celle produite par le processus chimique de combustion. Notons que le travail mécanique qui est dépensé par l'animal et qui est rendu au monde extérieur, consiste d'abord en chaleur, et ensuite en travail mécanique. Quand l'animal est au repos, tout le travail doit être dépensé sous forme de chaleur, d'où la conclusion que la quantité de chaleur créée par l'animal en repos est égale à celle produite par la combustion des matières nutritives. Il faudrait néanmoins signaler une petite différence qui concernerait l'urée, mais nous sommes forcés de supposer que celle-ci est aussi brûlée par l'animal et qu'elle s'aditionne à la chaleur produite

sans médiation. Les savants français Dulong et Despretz ont conduit des expériences sur ce problème. Ils ont découvert que les deux quantités de chaleur — l'une créée par le feu, l'autre émise par l'animal vivant — étaient presque identiques, du moins dans le cadre des déterminations de l'époque et des recherches qui étaient réalisées alors. La chaleur créée par la combustion des matières nutritives n'est toujours pas connue avec précision. Nous aurons donc besoin de mener des recherches sur la chaleur produite par des composés plus complexes dont la nourriture est constituée. Dulong et Despretz ont calculé le taux de chaleur sur la base de la théorie de Lavoisier — laquelle est presque, mais pas tout à fait vraie. Il demeure donc une petite incertitude quant à la quantité de [576] la chaleur. Mais les expériences démontrent que les quantités de chaleur sont, à un dixième près, réellement égales. Nous espérons que des recherches plus poussées sur la chaleur produite par la combustion des matières nutritives permettront de mieux rapprocher la mesure des quantités que dans la découverte de Dulong et Despretz.

Quand le corps n'est pas en repos et que des muscles travaillent, du travail mécanique est alors aussi créé. Celui-ci est soumis à de grandes variations selon l'activité des muscles. Si nous nous promenons sur un plan horizontal, nous devons vaincre la résistance causée par le frottement ainsi que la résistance de l'air. Mais ces résistances ne sont pas très grandes, si bien que le travail que nous fournissons en marchant sur un plan horizontal n'est quantitativement pas important. Nos muscles travaillent cependant de diverses manières. Les recherches de M. Redtenbacher, directeur de l'École Polytechnique de Karlsruhe, ont apporté la preuve que le procédé le plus efficace pour obtenir la plus grande quantité de travail possible de la part du corps humain est celui du manège, c'est-à-dire de la marche sur un plan incliné. Quand nous remontons la pente d'une colline, nous soulevons le poids de notre corps. Le même travail est produit dans le manège, sauf que celui-ci ne cesse d'évoluer en descente, alors que l'homme dans le manège marche sur place.

Le docteur Edward Smith a entrepris des recherches sur la quantité d'air inspiré et d'acide carbonique expiré pendant le travail dans un manège. Il a découvert qu'une accélération très surprenante a lieu pendant ce travail. Vous savez tous qu'en remontant une pente, vous êtes retenus de marcher trop vite par la fréquence et l'effort de la respiration. L'intensité de cet effort dépasse de loin celle des plus grands efforts de marche sur un plan horizontal : elle est en effet causée par l'importante production simultanée de travail mécanique. En nous référant aux expériences de Dulong et Despretz, et à celles du docteur Edward Smith, nous pouvons déterminer par calcul que le corps humain, s'il est en repos (mais

non pas en état de sommeil), consomme en une heure autant d'oxygène et brûle autant de carbone et d'hydrogène, c'est-à-dire crée l'équivalent de chaleur, nécessaire pour élever la température du corps entier (ou d'une quantité d'eau égale en poids) d' $1\frac{2}{10}^{\circ}\text{C}$ ($2\frac{2}{10}^{\circ}\text{F}$). Le docteur Smith a découvert [577] que s'il avait fait l'ascension d'une colline à la même vitesse qu'en marchant dans un manège, il aurait atteint en une heure l'altitude de 1712 pieds et que, dans ce laps de temps, il aurait exhalé cinq fois plus d'acide carbonique qu'à l'état de repos, et dix fois plus qu'à l'état de sommeil. C'est dire que la quantité de respiration a augmenté de façon très remarquable. Si nous évaluons ces chiffres, nous constatons que la quantité de chaleur produite à l'état de repos pendant une heure correspond à $1\frac{2}{10}^{\circ}\text{C}$, et que cela équivaut presque à l'ascension à une hauteur de 1712 pieds. Ainsi, la quantité de travail mécanique créé dans un manège ou en remontant une colline à marche rapide, est équivalente à la quantité totale de chaleur produite en état de repos. La quantité globale de décomposition dans le corps animé est cinq fois plus grande que celle produite à l'état de repos ou de sommeil. Un cinquième en est donc dépensé pour le travail mécanique, et quatre cinquièmes le sont pour la chaleur. En montant sur une colline ou en effectuant beaucoup de travail mécanique, vous vous réchauffez — la production de chaleur est très considérable, vous le savez sans vous lancer dans une expérience particulière. Il s'ensuit que la décomposition dans le corps s'intensifie sous l'effet du travail mécanique.

Les résultats des mesures nous suggèrent une autre analogie. En escaladant une colline, nous créons de la chaleur et du travail mécanique. Un cinquième de l'équivalent du travail produit par processus chimique est obtenu sous forme de travail mécanique. Si nous considérons maintenant notre machine à vapeur, une autre machine à air chaud ou n'importe quelle machine dont le fonctionnement repose sur la dilatation d'un corps par la chaleur, le dit corps imprime un mouvement à d'autres corps, — je dis, si nous considérons une machine thermo-dynamique, nous voyons que la quantité maximale de travail mécanique obtenue par décomposition ou combinaison chimique ne correspond qu'à un huitième de l'équivalent de la force chimique, les sept autres huitièmes étant dépensés sous forme de chaleur. Et cette quantité de travail mécanique n'est créée que si la différence de température dans une telle machine est extrême. Dans le corps animé, la différence de température n'est pas considérable, et la quantité de travail mécanique que l'on obtiendrait [578] serait fortement réduite si l'organisme était une machine thermo-dynamique (telle une machine à vapeur ou une machine à air chaud). De la grande quantité de travail créé par le corps humain, nous tirons la conséquence que celui-ci est dans

un sens une machine plus efficace que la machine à vapeur, mais que son combustible est plus onéreux que celui de la machine à vapeur.

Il existe une autre machine qui transforme la force chimique en force mécanique. C'est la machine magnéto-électrique. Par la force électrique, les machines de ce genre produisent plus de travail mécanique que nos machines thermo-dynamiques artificielles. Nous créons en diluant un morceau de zinc dans l'acide sulfurique, qui libère une autre substance oxydable. En général, cette force est créée par la différence entre l'attraction du zinc pour l'oxygène et celle du cuivre ou de l'acide nitreux pour l'oxygène. Le corps humain, quant à lui, brûle des substances contenant du carbone et de l'hydrogène, si bien que toute la quantité d'attraction du carbone et de l'hydrogène profite à l'entretien du mouvement de la machine. Dans ce sens, le pouvoir du corps animé est plus grand et plus avantageux que celui de la machine magnéto-électrique.

Considérons à présent les conséquences qu'il faut tirer de l'accord des lois régissant la vie animale avec la conservation de la force, du moins dans la mesure où nous pouvons nous permettre de porter un jugement sur ce sujet. Nous n'avons pas encore réussi à fournir la preuve que le travail produit par un corps animé correspond exactement aux forces chimiques qui y sont libérées. Il n'a pas non plus été possible de déterminer la valeur de l'une ou l'autre quantité avec la précision qui sera sans doute atteinte dans l'avenir. Mais nous pouvons espérer atteindre ce degré de précision dans un avenir proche. Aucune difficulté de principe ne s'oppose à cette tâche. Je pense que nous pouvons tenir pour probable la vérité de la loi de la conservation de la force pour les corps animés en général.

Posons maintenant la question de savoir ce qu'il s'ensuit de ce fait pour la nature des forces agissant dans le corps vivant.

Presque tous les physiologistes du siècle passé et du début de notre siècle ont été persuadés que les corps organisés étaient déterminés par un seul agent majeur, [579] qu'il ont nommé le « principe vital ». Les forces physiques dans un corps animé, supposaient-ils, pouvaient être suspendues ou, au contraire, libérées à n'importe quel moment sous l'influence du principe vital, et que cet agent produisait par conséquent des modifications à l'intérieur du corps afin de maintenir ou de restaurer la santé de ce corps.

La conservation de la force ne s'applique cependant qu'à des systèmes dans lesquels les forces mises en action (comme toutes les forces de la nature inanimée) ont toujours la même intensité et la même direction si les circonstances de leur action sont identiques. S'il était possible de

dérober un corps de sa gravité, et de la lui restituer à nouveau par la suite, nous créerions en effet le mouvement perpétuel. Laissons descendre un corps aussi longtemps qu'il possède du poids ; laissons-le se soulever quand sa gravité est perdue — alors vous aurez créé du travail mécanique de rien. Ainsi, la croyance que le pouvoir chimique des éléments puisse être suspendu ou modifié ou annihilé à l'intérieur du corps animé, doit être abandonnée si la conservation de la force ne tolère aucune exception.

D'autres agents que ceux présents dans la nature inorganique agissent peut-être dans le corps animé. Mais dans la mesure où ces forces exercent une influence chimique ou mécanique sur le corps, elles relèvent nécessairement du même ordre que les forces inorganiques, du moins dans la mesure où leurs effets sont régis par la nécessité et doivent toujours être identiques dans les mêmes conditions. La direction de leurs actions n'est pas sujette à un choix arbitraire.

C'est là le principe fondamental de la physiologie auquel j'ai fait allusion au début de cette conférence.

Et pourtant, certains physiologistes croyaient que le principe vital causait les processus vitaux, et que quiconque se faisait l'interprète de l'opinion selon laquelle le sang coulait dans les vaisseaux par l'action mécanique du cœur, ou que la respiration se produisait selon la loi commune de la diffusion des gaz, abaissait la dignité et l'essence de la vie.

La génération actuelle, par contre, s'applique à découvrir les causes réelles des processus se déployant dans les corps animés. Nos savants avancent l'hypothèse selon laquelle la différence [580] entre les actions chimiques et les actions mécaniques à l'intérieur d'un corps vivant ou partant de celui-ci s'expliquent par les circonstances et les conditions plus complexes dans lesquelles les premières ont lieu, et nous avons vu que cette hypothèse tire toute sa légitimité de la loi de la conservation de la force. Cette loi indique, en outre, la voie qu'il faut suivre pour trouver une réponse réelle et complète à travers l'expérimentation à cette question fondamentale qui a suscité tant de spéculations théoriques.