

b. Mécanique rationnelle; astronomie,
physique, chimie.

De toutes les sciences, la mécanique est celle qui a fait de notre temps les progrès les plus étonnamment rapides. « Donnez-moi de la matière et du mouvement, disait Descartes, et je referai le monde. » Cette grande parole est aujourd'hui presque intégralement réalisée, au moins en ce qui concerne le monde matériel. L'astronomie, la physique, la chimie sont en voie d'être ramenées à des problèmes de mécanique. Il est devenu même très difficile d'établir une classification nettement distincte de toutes ces sciences.

Avec la mécanique rationnelle, nous sortons du domaine de l'abstraction mathématique pour prendre pied dans le domaine de la réalité.

Elle étudie les lois du mouvement des corps matériels; mais ici se pose, bon gré mal gré, une question de métaphysique qu'il est impossible de passer sous silence.

Qu'est-ce que la matière? Qu'est-ce que la force?

Voici les définitions admises par Bélanger, un des théoriciens les plus autorisés et les plus rigoureux de notre temps.

On appelle *point matériel* un corps tellement

petit que les trajectoires de tous ses éléments se confondent.

Un corps ordinaire est un assemblage de *points matériels* séparés par des distances d'un ordre de grandeur variable.

On admet comme principe fondamental, ou plutôt comme *postulatum*, qu'un point matériel ne peut pas lui-même ni se mettre en mouvement s'il est en repos, ni changer soit en grandeur soit en direction sa vitesse s'il en a une. C'est ce qu'on appelle le principe de l'*inertie* de la matière.

On appelle *force* la cause extérieure au point matériel et nécessaire pour modifier en grandeur ou en direction la vitesse dont il est animé.

On appelle enfin *masse* d'un point matériel une *grandeur propre* à ce corps et qui fait qu'une certaine force est nécessaire pour produire sur ce point matériel une modification déterminée de la vitesse qui l'anime. Dire, comme on le fait souvent, que la masse d'un corps est la *quantité de matière* qu'il renferme, c'est admettre implicitement que tous les points matériels sont égaux, de même substance; que la même force produit le *même effet* sur un quelconque d'entre eux; et qu'enfin les corps ne diffèrent entre eux que par le nombre et les distances mutuelles des points matériels qu'ils

comprennent. Dire, comme le veulent la plupart des auteurs modernes, que la masse d'un corps est le rapport numérique d'une force à l'accélération qu'elle produit sur ce corps, c'est confondre une chose avec son expression numérique, c'est comme si l'on prétendait définir l'étendue d'un rectangle le produit de sa base par sa hauteur.

Reprenons une à une ces définitions pour voir si l'hypothèse sur laquelle elles reposent est philosophiquement acceptable.

Du principe posé par Maine de Biran, complété par Sully-Prudhomme (voir chap. II), et sur lequel repose tout l'édifice de nos connaissances, il résulte que, dans certains cas, nous avons conscience d'une résistance extérieure égale et contraire à un effort que nous exerçons. Mais, dans d'autres cas, cette résistance ne nous est pas opposée. Par une analogie invincible nous sommes amenés à conclure à l'existence de systèmes de forces dispersés autour de nous, et émanant d'origines homogènes à la source de nos propres efforts.

Nous avons bien le droit de dénommer *corps matériels* ces différents systèmes de forces, et de leur attribuer des dimensions et une situation dans ce que nous appelons l'espace.

La décomposition des corps en points maté-

riels est une décomposition *idéale*, que nous sommes autorisés à opérer comme celle d'une force en ses composantes.

Le *postulatum* de l'inertie des points matériels est légitimé par ce fait à la fois théorique et expérimental que, dans les objets qui tombent sous nos sens, y compris les corps vivants, il existe un point, le centre de gravité, dont la vitesse ne peut être modifiée en grandeur et en direction que par l'intervention d'une force extérieure à l'objet. Il suit de là que, si l'on réduit par la pensée un corps aux dimensions d'un point matériel, ce point se confond avec le centre de gravité du corps et partage avec lui les propriétés de l'inertie telle qu'elle est définie plus haut. Jusqu'ici je ne vois donc pas incompatibilité entre les données de la métaphysique moderne et les principes de la mécanique rationnelle.

Arrivons à la masse d'un point matériel définie une *grandeur propre à ce corps et qui fait qu'une certaine force est nécessaire pour produire une modification déterminée de la vitesse*.

Ici se présente une difficulté : il est permis sans doute d'admettre qu'on peut réduire au delà de toute limite les dimensions d'un corps donné, — c'est de la géométrie pure, — mais

peut-on affirmer que, dans cette réduction, certaines propriétés physiques ne seront pas altérées? Une *propriété* physique

.....n'est pas ce qu'un vain peuple pense.

La définition exacte en comprend deux termes, l'un l'existence d'une cause extérieure à nous, l'autre la *réaction particulière* exercée sur nos organes par cette cause.

Supposons un corps dont les dimensions soient réduites proportionnellement, de façon que son image tout entière soit comprise sur un même élément rétinien. Organisés comme nous le sommes, nous n'aurons plus qu'une sensation indivisible, une sensation *atome*; toute perception de longueur, de direction, de rotation relative aura totalement disparu pour nous. Et qu'on n'aille pas objecter que, pour des êtres doués de sens plus parfaits, la distinction des propriétés qui résultent de la forme pourra continuer de s'opérer. A cela je répondrais que la réduction idéale d'un corps à l'état de point matériel a précisément pour objet de supprimer la différence des trajectoires diverses, d'annuler des mouvements de rotation, et les forces composées qui en résultent, etc.

De même, géométriquement, on peut toujours concevoir une distance plus petite du tiers, du

quart, de la moitié qu'une distance quelconque donnée à l'avance. Mais, physiquement ou plutôt physiologiquement parlant, quand deux pointes de compas sont suffisamment rapprochées, la perception de leur distance mutuelle disparaît pour nous.

J'aurai occasion de revenir plus bas sur ces phénomènes physiologiques, mais, dès à présent, et sans insister davantage, ils me semblent fournir la preuve que, dans la réduction idéale des dimensions d'un corps fini aux proportions d'un point matériel, certaines propriétés peuvent disparaître ou s'altérer jusqu'à un certain degré.

A raisonner par analogie, il paraît difficile d'affirmer que la propriété qui s'appelle la masse et qui, pour les corps matériels, est évidemment liée à la structure interne, ne sera pas modifiée dans la réduction du corps aux proportions d'un point matériel.

L'hypothèse la plus plausible est donc, au moins à ce qu'il me semble, d'admettre que le point matériel correspond au *minimum* de perception concevable de ce qu'on appelle la masse; que la masse des points matériels est égale chez tous en tant que *minimum* d'une même fonction; qu'une force quelconque agit de la même manière sur les masses égales des points maté-

riels; et qu'enfin, par conséquent, la masse des corps de dimensions finies peut bien être définie *la quantité de matière* ou plus exactement encore *le nombre de points matériels qu'ils renferment sous un volume donné*.

Passons à la force.

Je lis, dans le cours de Bélanger : « Toute force réellement, physiquement existante, non seulement est subie par un élément matériel, mais encore est nécessairement due à l'existence simultanée d'un autre élément matériel plus ou moins éloigné, et qui, par conséquent, doit être considéré comme exerçant sur le premier la force dont il s'agit. »

Avant Bélanger, Poncelet avait exprimé la même idée dans son *Cours de Mécanique industrielle*.

D'autre part, philosophiquement, nous ne connaissons les forces que par leur identité avec notre propre effort, effort déployé en somme par notre propre corps, et il nous est impossible de concevoir une force autrement que comme liée à un corps quelconque dont elle émane par un *processus* que nous ignorons, mais qui peut ou doit être analogue à celui d'où naissent nos propres efforts.

De tout ceci il résulte, ce me semble, qu'il faut considérer la force comme une propriété

des corps matériels, de la *matière* si l'on veut, propriété servant à définir les relations des points matériels entre eux.

L'enseignement classique, la Mécanique moderne, ne méritent donc pas le reproche qui leur a été adressé si souvent de supposer une matière *inerte* à laquelle seraient attelées, comme des chevaux-fantômes, des forces *abstraites*.

Maintenant, comment des points matériels, séparés les uns des autres, peuvent-ils agir à distance les uns sur les autres?

Cette question, si souvent posée, est insoluble si l'on suppose absolument vides les espaces qui séparent les points matériels; mais elle perd, ce me semble, beaucoup de son caractère contradictoire, si l'on se borne à dire que, jusqu'ici, nos sens n'ont pu déterminer la nature du milieu intermédiaire qui sert de véhicule aux actions mutuelles des points matériels.

En tout cas, restant sur le terrain de la pure expérience, on peut s'en tenir à la prudente formule de Newton et dire que *les choses se passent comme si* les points matériels s'attiraient ou se repoussaient à distance suivant des lois connues ou à déterminer.

Ces prémisses posées, passons aux définitions et aux théorèmes qui, depuis cent ans, sont venus enrichir la Mécanique rationnelle.

Coriolis et Poncelet ont donné les premiers la notion précise du *travail* des forces.

Poinsot a imaginé les couples et découvert un certain nombre de théorèmes extrêmement remarquables sur la rotation des corps solides.

Sur la théorie de l'énergie, je demanderai la permission d'entrer dans quelques détails, parce que dans ces quarante dernières années elle a pris une importance extraordinaire.

Le mot énergie a été proposé pour la première fois par Thomas Young dans ses admirables *Lectures on Natural Philosophy*. C'est en langage mécanique la quantité de travail qu'un corps peut fournir. L'énergie d'un système de corps ou de points matériels exerçant les uns sur les autres des forces dépendant de la position relative de ces points, est due en partie au mouvement dont ces corps ou points sont actuellement animés et en partie à la position qu'ils occupent dans l'espace.

Un corps pesant est en train de tomber avec une vitesse uniformément croissante; à un moment donné, il possède une *puissance vive*, une capacité de travail égale à la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse. Cette énergie qu'il transmettrait par le choc par exemple a reçu de Thomson et Tait le nom d'*énergie cinétique*.

Le même corps pesant est suspendu par une corde à une hauteur déterminée; il n'a, pour le moment, aucune énergie *réalisée*, pour ainsi dire, mais, de ce qu'il est suspendu à une hauteur donnée, on peut induire la quantité de travail, l'énergie cinétique qu'il pourrait fournir en arrivant sur le sol si on coupait la corde. Cette énergie *éventuellement réalisable* a été baptisée par Rankine du nom, très heureusement choisi, d'*énergie potentielle*.

On a prouvé par le calcul que si, dans un système de points matériels quelconque, les actions mutuelles de ces points s'exercent suivant la droite qui les joint et ne dépendent que de la distance qui les sépare, la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle du système reste constante.

Nous ne pouvons affirmer avec certitude que ces deux conditions soient remplies par les forces intérieures qui s'exercent entre les particules d'un corps réel. Nous ne pouvons même affirmer qu'il n'existe pas une autre espèce d'énergie, bien qu'il nous soit impossible de la concevoir.

Néanmoins le principe de la conservation de l'énergie, démontré exact pour des systèmes remplissant certaines conditions, prouvé expérimentalement, dans les cas où l'énergie prend

la forme de chaleur, d'électricité, de magnétisme, etc., se présente avec le caractère de la plus haute probabilité.

En le généralisant, comme l'a fait Helmholtz dans son beau mémoire sur la *Conservation de la force*, on peut l'énoncer ainsi :

L'énergie totale d'un système de corps ou de molécules est une quantité qui ne peut être accrue ou diminuée par aucune des actions que ces corps ou ces molécules peuvent exercer les uns sur les autres, bien qu'elle puisse prendre toutes les formes que comporte l'énergie.

Ex nihilo nihil, in nihilum posse reverti.

Cet aphorisme qui, appliqué à la conservation de la matière, a permis à Lavoisier de faire de la chimie une science, est donc également applicable à la conservation de la force ou plutôt de la capacité de travail, de l'énergie ¹. Comme il a été dit plus haut, les théorèmes précédents ne peuvent être considérés comme vrais qu'à la suite de la démonstration expérimentale de

1. Dans son livre déjà cité, M. Stallo soutient qu'on ne peut affirmer le principe de la conservation de la matière parce qu'un corps lourd transporté au haut d'une montagne perd une partie de son poids. Cette objection ne me paraît pas fondée, car, si le corps semble perdre une partie de son poids, c'est en raison des forces naissant du mouvement de rotation de la terre (forces apparentes de Coriolis) qui viennent diminuer en partie les effets de la pesanteur, mais non la pesanteur elle-même.

l'équivalence, de la possibilité de transformation mutuelle de ce qu'on appelle les *forces de la nature*, chaleur, électricité, gravitation, etc.

Il importe de bien s'entendre sur la signification de ces différents termes.

Le sens primitif du mot chaleur, par exemple, se rapporte à une sensation bien connue; il a été remarqué dès le début que les corps qui produisaient en nous cette sensation déterminaient en même temps, sur d'autres corps voisins, des effets très caractérisés, dilatation, changement d'état, incandescence, etc.

Ces différents effets ont été attribués à une seule et même cause qu'on a désignée sous le nom de chaleur, bien que la sensation éprouvée au voisinage des corps chauds soit un effet physiologique, et la dilatation un effet physique, mécanique même.

En réalité, d'après la théorie actuelle, la chaleur est l'énergie spéciale aux mouvements moléculaires des corps, énergie qui, sur nos organes de la sensibilité générale, donne la sensation connue, et qui, se transmettant sur un autre corps, en modifie les mouvements moléculaires.

Considérée de ce point de vue, la transformation de la chaleur en travail mécanique n'a rien de bien extraordinaire, et elle avait été soup-

connée depuis longtemps, notamment par Rumfort, Davy, Montgolfier, Séguin.

Dans des notes restées inédites pendant cinquante ans, Sadi Carnot, sur lequel nous allons revenir bientôt, formulait en termes très exacts les principes que Mayer et Joule devaient découvrir et démontrer quinze années plus tard.

« La chaleur, disait-il, n'est autre chose que la puissance motrice ou plutôt le mouvement qui a changé de forme. C'est un mouvement dans les particules du corps. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a en même temps production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la puissance motrice détruite. Réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice¹. »

Robert Mayer, qui ne connaissait pas cet énoncé, a eu l'immense mérite d'abord de le trouver à son tour, puis surtout de calculer le coefficient proportionnel de cette transformation de chaleur en travail, ce qu'on a appelé depuis l'*équivalent mécanique* de la chaleur.

Joule a trouvé une détermination plus exacte, a multiplié les expériences, a établi l'équiva-

1. Ce passage est extrait de la *Thermo-dynamique* de Joseph Bertrand.

lence des transformations de la chaleur en électricité. C'est à ces deux physiciens, l'un Allemand, l'autre Anglais, que l'on doit la première loi de la thermodynamique, dont l'énoncé a été si bien formulé dans l'écrit posthume cité plus haut de Sadi Carnot.

C'est à ce dernier, au contraire, avec Clausius, dont la science regrette la perte récente, qu'on doit la seconde loi de la thermodynamique, découverte dans des conditions fort étranges.

En 1824, au moment où Sadi Carnot, officier du génie, a publié ses mémorables *Réflexions sur la puissance motrice des machines à feu*, il croyait encore que la chaleur ou, suivant l'expression alors consacrée, le « calorique » était une sorte de substance matérielle indestructible dont les corps étaient comme imbibés à des degrés divers. Raisonnant dans cette hypothèse, Sadi Carnot compara la machine à feu à une roue hydraulique; l'eau est la même à l'entrée et à la sortie de la roue; la seule chose qui est changée en elle c'est sa position: elle a passé d'un niveau plus élevé à un niveau plus bas; le travail disponible est le produit de la masse de l'eau par la moitié du carré de la vitesse. A faire tourner la roue, une partie de ce travail disponible a disparu, et l'eau est arrivée en bas avec une vitesse beaucoup moindre; elle ne peut

remonter d'ailleurs d'elle-même à son niveau primitif.

Si on remplace dans cet énoncé le mot puissance vive ou travail disponible de l'eau par le mot chaleur, le mot roue par le mot machine à vapeur, le mot niveau par le mot température, on a la seconde loi de la thermodynamique.

En raisonnant tout le temps sur des hypothèses fausses, Sadi Carnot a donc trouvé une loi vraie, au grand scandale de physiciens et de mathématiciens très corrects qui n'ont jamais rien trouvé du tout.

L'explication en est bien simple : au lieu de poser des équations en nombre incalculable, et de tourner la manivelle algébrique sans jamais chercher à imaginer les phénomènes, Sadi Carnot s'est placé dans les conditions des chercheurs heureux ; il a imaginé un *schéma* de la machine à feu ; il a vu se dérouler, devant les yeux de son esprit, les phases successives des phénomènes, et il a pu ainsi se rendre compte des relations qui subsistent entre eux. C'est le procédé de tous les inventeurs ; Edison, Gramme, Bell n'ont pas fait autrement.

Sadi Carnot était oublié ainsi que sa découverte, dont l'importance avait été à peine comprise par Clapeyron, lorsque quelque trente ans plus tard Clausius reprit la question, rectifia les

hypothèses inexacts, et détermina la fonction de la température qui représente le rapport entre la quantité de chaleur fournie et le travail accompli.

Avec une abnégation, une loyauté bien rares, Clausius donna le nom de loi de Carnot au théorème qu'il avait le premier démontré d'une façon rigoureuse¹.

Quoi qu'il en soit, on voit qu'il existe, pour le passage de la chaleur d'un corps à un autre, une condition analogue à la différence de niveau qui détermine le mouvement de l'eau dans un fleuve : c'est que la *température* d'un des corps soit supérieure à celle de l'autre. De même, en électricité, il faut une différence de tension électrique entre deux corps pour qu'un courant s'établisse de l'un à l'autre.

Différence de niveau, de température, de tension, sont des cas particuliers des différences d'une fonction appelée *potentiel*, découverte par Lagrange au point de vue purement analytique, et qui se retrouve partout où il y a mouvement.

Du principe de Carnot, Clausius a tiré entre autres une conséquence bien remarquable. Si l'on suppose une quantité de chaleur allant d'un corps chaud à un corps froid et produisant une certaine

1. Rappelons ici le théorème d'Yvon Villarceau sur l'expression de la puissance vive d'un système.

quantité de travail, après l'opération, le corps chaud sera refroidi, le corps froid sera réchauffé. Si bien que toute action mécanique tend à établir l'équilibre de température entre tous les corps; et que, comme il faut une différence de température pour produire du travail, quand cet équilibre sera établi, tout travail mécanique deviendra impossible, à moins qu'un autre système de corps ne vienne fournir à l'ancien une nouvelle quantité de chaleur disponible. C'est probablement là l'explication de la mort des divers systèmes stellaires et planétaires.

Comment ces mouvements moléculaires qui se traduisent pour nous sous les formes de la chaleur, de la lumière, de l'électricité, peuvent-ils se transmettre à distance, et quelle est la nature de ces mouvements?

On a pu résoudre ce problème, au moins en fournir une solution très plausible, par analogie avec les phénomènes du son.

Depuis longtemps on savait que le son est la réaction particulière produite sur l'oreille par un mouvement vibratoire du corps sonore transmis à l'air du conduit auditif. Dans le mouvement de va-et-vient qui constitue la vibration du corps sonore, l'air se trouve tantôt comprimé, tantôt dilaté au contact de ce corps. De là des ondes alternativement condensées et dilatées

qui se propagent dans l'air, comme les ondes liquides déterminées sur un bassin plein d'eau par la chute d'un caillou.

Huyghens avait supposé l'un des premiers que les phénomènes lumineux étaient également la réaction produite sur l'œil par un mouvement vibratoire d'un milieu élastique, l'*éther*. Newton avait apporté l'appui de son incomparable autorité à une théorie contraire, l'*émission*, d'après laquelle les corps lumineux émettraient des corpuscules animés d'une grande vitesse et dont le choc sur la rétine produirait l'impression lumineuse.

Cette théorie de l'*émission*, quoique battue en brèche par le phénomène des interférences, où l'on voit de la lumière ajoutée à de la lumière produire de l'obscurité, conserva des adhérents jusque vers le milieu du siècle. (Un des derniers fut le physicien Biot.)

Mais Th. Young et Fresnel produisirent des arguments décisifs; le dernier surtout constitua la théorie de l'ondulation sur des bases définitives.

Fresnel, Arago, Fizeau et Foucault, Cornu, au moins pour la France, arrivèrent à mesurer exactement le nombre par seconde des vibrations de l'*éther*, et les longueurs d'onde (c'est-à-dire les distances entre deux ondes dilatées ou conden-