Les paragraphes imprimés en petits caractères sont ceux qu'on pourra laisser de côté à une première lecture. Les développements donnés dans ces paragraphes ne sont pas indispensables pour l'intelligence du reste de l'ouvrage.

TRAITÉ DE PHYSIQUE ÉLÉMENTAIRE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

I. — NOTIONS DE MÉCANIQUE.

MOUVEMENTS. — FORCES.

1. **Mouvement en général.** — On appelle *trajectoire* d'un point en mouvement, la ligne formée par les positions successives de ce point. — Le mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*, selon que la trajectoire est une ligne droite ou une ligne courbe.

Pour que le mouvement d'un point soit complètement défini, il ne suffit pas de connaître la trajectoire, il faut connaître encore la loi suivant laquelle il la parcourt. Dans chacun des mouvements simples que nous allons étudier, il est facile d'obtenir une relation entre les valeurs du *temps t*, compté à partir d'un instant déterminé, et les valeurs correspondantes de l'*espace e* qui sépare le point mobile d'un point fixe pris sur la trajectoire, cet espace étant compté sur la trajectoire elle-même. — Une pareille relation prendra le nom d'*équation du mouvement sur la trajectoire*.

Dans ce qui va suivre, nous supposerons les temps évalués en *secondes*, et les espaces évalués en *mètres*.

2. **Mouvement uniforme.** — Un mouvement est dit *uniforme* lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux sont égaux, quels que soient ces temps. On appelle *vitesse* d'un mouvement uniforme, l'espace parcouru dans un intervalle de temps égal à l'unité.

La définition même du mouvement uniforme donne immédiatement la forme de l'équation de ce mouvement. Soit v le nombre constant qui exprime la vitesse, et convenons, pour plus de simplicité, de compter les espaces à partir du point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine du temps ; au bout d'un nombre t de secondes, la distance e qui sépare le mobile de l'origine des espaces sera

$$e = vt.$$

Étant donné un point animé d'un pareil mouvement, il suffira, pour déterminer la vitesse v, de mesurer l'espace parcouru en un certain nombre de secondes, et de diviser cet espace par ce nombre de secondes.

3. Mouvement varié. — Vitesse moyenne entre deux instants déterminés. — Vitesse à un instant déterminé. — Un mouvement est dit *varié*, lorsque les espaces parcourus dans des intervalles de temps égaux ne sont pas égaux.

Soit AB (*fig.* 1) la trajectoire d'un mobile animé d'un mouvement varié. Soit A le point où se trouve le mobile à l'instant pris pour origine

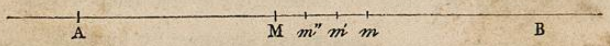

Fig. 1.

du temps, et convenons de compter les espaces à partir de ce point. Soit M la position du mobile à l'instant t; désignons la longueur AM par e, cette quantité étant comptée positivement dans le sens AB. Soit Am l'espace parcouru à l'instant $t+\theta$; désignons-le par $e+\varepsilon$. La longueur Mm ou ε est celle que le mobile a parcourue pendant l'intervalle de temps θ. Or on peut concevoir un second mobile parcourant cette même longueur, non plus d'un mouvement varié, mais d'un mouvement uniforme, dans le même intervalle de temps : d'après ce qu'on vient de voir, la vitesse de ce mobile serait $\frac{\varepsilon}{\theta}$. Cette vitesse est ce qu'on nomme la *vitesse moyenne* du premier mobile, entre les deux instants t et $t+\theta$: elle s'obtient, comme on voit, en divisant l'accroissement ε de l'espace parcouru par l'accroissement θ du temps.

Considérons maintenant, au lieu de l'accroissement θ donné au temps t, un accroissement plus petit θ'; l'espace parcouru AM sera accru seulement de Mm' ou ε', et la vitesse moyenne, entre le temps t et le temps $t+\theta'$, sera $\frac{\varepsilon'}{\theta'}$. De même, pour un accroissement de temps encore plus petit θ'', l'accroissement d'espace étant Mm'' ou ε'', la vitesse moyenne entre le temps t et le temps $t+\theta''$ sera $\frac{\varepsilon''}{\theta''}$, et ainsi de suite. Or, si l'on fait décroître indéfiniment les intervalles $\theta, \theta', \theta''$..., les quo-

tients $\frac{\varepsilon}{\theta}, \frac{\varepsilon'}{\theta'}, \frac{\varepsilon''}{\theta''}$.... tendent en général vers une limite déterminée; cette limite est ce qu'on nomme la *vitesse à l'instant t*. — On appelle donc *vitesse à un instant déterminé*, la limite vers laquelle tend le rapport de l'accroissement ε de l'espace à l'accroissement θ du temps, lorsque θ converge vers zéro.

On voit que la vitesse doit être considérée comme positive ou négative, selon que ε est lui-même positif ou négatif.

4. Mouvement uniformément varié. — Un mouvement est dit *uniformément varié*, lorsque la vitesse varie de quantités égales en des temps égaux, quels que soient ces temps. — On appelle *accélération*, dans un pareil mouvement, la variation de la vitesse dans l'unité de temps. — Le mouvement est *uniformément accéléré* ou *uniformément retardé*, selon que l'accélération et la vitesse sont de même signe ou de signes contraires.

Considérons, par exemple, un mobile animé d'un mouvement *uniformément accéléré*. Soit v_0 sa vitesse initiale, c'est-à-dire sa vitesse à l'instant pris pour origine du temps; soit γ l'accélération; nous supposerons v_0 et γ positifs. Si l'on désigne par v la vitesse au bout du temps t, on a, d'après la définition même de l'accélération,

$$v = v_0 + \gamma t. \tag{1}$$

Cette équation peut se transformer en une autre qui donne l'espace parcouru e, compté à partir du point où se trouvait le mobile à l'origine du temps. — On démontre en effet, par un raisonnement pour lequel nous renverrons aux Traités de Mécanique, que la relation (1) conduit à la relation équivalente

$$e = v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}. \tag{2}$$

Remarque. — Si l'on considère le cas particulier où la vitesse initiale est nulle, on a $v_0 = 0$; alors la formule (1) devient

$$v = \gamma t,$$

c'est-à-dire que, dans ce cas particulier, *les vitesses sont proportionnelles aux temps.*

La formule (2) devient, dans la même hypothèse,

$$e = \frac{\gamma t^2}{2},$$

c'est-à-dire que *les espaces sont proportionnels aux carrés des temps.*

Enfin, si l'on élimine le temps t entre les deux équations que l'on vient d'obtenir, on a

$$v = \sqrt{2\gamma e},$$

c'est-à-dire que *les vitesses sont proportionnelles aux racines carrées des espaces parcourus.*

L'une quelconque de ces trois lois, qui se déduisent les unes des autres, suffit pour caractériser le mouvement. — Ces divers résultats trouveront leur application dans l'étude des mouvements des corps sous l'action de la pesanteur.

5. **Principe de l'inertie.** — *Un corps ne peut modifier de lui-même ni son état de repos, ni son état de mouvement.* — Par cet énoncé général, on doit entendre :

1° Qu'un point en repos, si aucune cause n'agit sur lui, demeure en repos : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le repos;*

2° Qu'un point en mouvement, si aucune cause n'agit sur lui, conserve indéfiniment un mouvement rectiligne et uniforme : c'est ce qu'on peut appeler l'*inertie dans le mouvement.*

Le principe de l'inertie dans le mouvement a été énoncé pour la première fois par Képler : il paraît, au premier abord, contredit par un certain nombre de faits d'observation; un examen attentif montre qu'il n'y a là qu'une contradiction apparente (*).

6. **Forces. — Effets dynamiques et effets statiques.** — On appelle *force*, toute cause capable de produire le mouvement, ou d'en modifier la nature.

L'existence des forces peut nous être révélée par des phénomènes très divers. Si un point matériel, primitivement en repos, se met en mouvement, c'est qu'une force agit sur lui. Si un point matériel est animé d'un mouvement rectiligne et accéléré, c'est qu'il est soumis à l'action d'une force, dans la direction du mouvement, et dans le même sens, etc. — Ces effets des forces, se manifestant par la production ou par une modification du mouvement, peuvent être désignés sous le nom d'*effets dynamiques*.

Lorsque les points soumis à l'action des forces sont assujettis de façon à rester immobiles, l'existence des forces se manifeste par d'autres effets, auxquels on donne le nom d'*effets statiques*. — Ainsi, un corps pesant, placé en repos sur un plan horizontal, produit une *pression* qui arriverait à rompre le plan si le poids du corps dépassait une certaine limite. Le même corps, suspendu à un fil, produit sur ce fil une *tension*. Enfin, un corps pesant, suspendu à un ressort comme celui de la figure 5, produit sur lui une *flexion* (**). —

(*) Si, par exemple, une bille lancée sur un plan horizontal ne continue pas à se mouvoir indéfiniment, c'est que le frottement de la bille sur le plan a pour effet de diminuer progressivement sa vitesse, jusqu'à la rendre nulle.

(**) Dans chacun de ces cas, la résistance offerte par le plan, par le fil, ou par le ressort, doit être considérée comme développant une *réaction*, égale et contraire à l'*action* que la pesanteur exerce sur le corps. Il est clair en effet que, si l'on supprimait le plan, le fil ou le ressort, on devrait, pour maintenir le corps en repos, lui

Ces divers effets peuvent servir, non seulement à constater l'existence des forces, mais aussi à les mesurer, comme nous allons le voir.

7. **Mesure des forces.** — On dit, en général, que deux forces sont *égales* lorsque, agissant sur un même corps, dans les mêmes conditions, elles produisent un même effet.

Pour comparer entre elles des forces inégales, il faut admettre le principe suivant, qui est confirmé par la vérification de ses conséquences : *Lorsque plusieurs forces agissent simultanément sur un point, l'action de chacune d'elles est la même que si elle agissait seule.*

Ce principe étant admis, on dit qu'une force F est égale à *n fois* une autre force *f*, lorsqu'elle produit, dans les mêmes conditions, le même effet que *n* forces égales à *f*, agissant simultanément.

8. **Dynanomètres.** — On désigne sous le nom de *dynanomètres* des instruments qui sont destinés à mesurer les forces par les effets de flexion qu'elles font éprouver à un ressort.

La figure 2 représente un dynamomètre formé d'une lame d'acier flexible ABC, recourbée en forme de V; à chacune de ses extrémités, A, C, est fixé un arc métallique qui traverse une ouverture pratiquée près de l'autre extrémité. L'un de ces arcs se termine par un anneau D, qui sert à soutenir l'instrument (*fig.* 3); l'autre, par un crochet E. Pour gra-

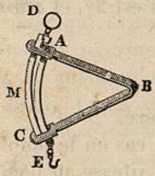

Fig. 2.

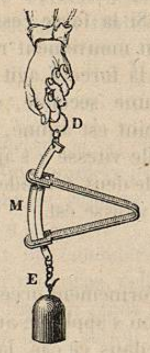

Fig. 3.

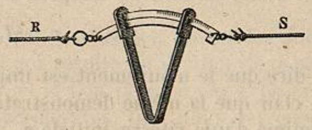

Fig. 4.

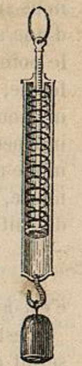
Fig. 5.

duer l'instrument, on suspend successivement, au crochet E, des poids de 1, 2, 3, 4 kilogrammes, etc. ; le ressort s'infléchit de plus en plus, et l'on marque, à chaque fois, le point de l'arc extérieur MD qui correspond à l'ouverture de la branche A qu'il traverse. — Si maintenant on attache l'anneau à un point fixe, à l'aide d'une corde R, par exemple

appliquer une force égale et contraire à son poids. — Newton a montré que c'est là un principe général. Une force quelconque, appliquée à un corps en repos ou en mouvement, détermine toujours une *réaction*, représentée par une force égale et contraire.

(*fig.* 4), et si l'on applique au crochet une force quelconque par l'intermédiaire d'une autre corde S, il se produit, comme précédemment, une flexion du ressort; selon que cette flexion est égale à celle que déterminait un poids de 2, 4, 10 kilogrammes, on dit que l'*intensité de la force est de* 2, 4, 10 *kilogrammes*.

On emploie quelquefois aussi des dynamomètres (*fig.* 5) formés par un ressort à boudin dont l'une des extrémités s'appuie contre la base supérieure A d'un cylindre métallique AB, auquel est fixé le crochet E; l'autre extrémité s'appuie sur un disque P, fixé à une tige terminée par un anneau D. Cette tige, qui traverse librement la base supérieure du cylindre, sort d'une quantité plus ou moins grande, selon que la force appliquée au crochet est plus ou moins grande.

9. **Une force constante, agissant seule sur un point matériel entièrement libre, lui imprime un mouvement uniformément accéléré.** — La démonstration de ce théorème repose sur le principe suivant, qu'on doit encore considérer comme confirmé par la vérification de ses conséquences : *L'action d'une force sur un point est indépendante du mouvement dont ce point est primitivement animé : elle est la même que si le point était au repos.*

Ce principe étant admis, soit une force F agissant sur un point que nous supposerons d'abord au repos : cette force lui imprime, au bout d'une seconde, une certaine vitesse γ. Si la force cessait alors d'agir, le point continuerait à se mouvoir, d'un mouvement rectiligne et uniforme, avec la vitesse γ (5,2°); si donc la force F agit sur lui pendant un nouvel intervalle de temps égal à une seconde, son action étant indépendante du mouvement dont le point est animé, elle lui communique au bout de ce temps, une nouvelle vitesse γ s'ajoutant à la première, en sorte que la vitesse au bout de deux secondes est 2γ, et ainsi de suite. Donc, au bout du temps t, la vitesse est

$$v=\gamma t,$$

c'est-à-dire que le mouvement est uniformément accéléré.

Il est clair que la même démonstration s'applique au cas où le point serait animé d'une vitesse initiale v_0 : dans ce cas, la vitesse au bout du temps t serait exprimée par $v_0+\gamma t$.

10. **Deux forces constantes sont entre elles comme les accélérations qu'elles impriment à un même mobile.** — Soient deux forces F, F'; supposons qu'elles aient une commune mesure f, et qu'on ait

$$F=nf, \quad F'=n'f, \quad \text{et par suite } \frac{F}{F'}=\frac{n}{n'}.$$

Si la force f agissait seule sur le mobile considéré, elle lui imprimerait un mouvement uniformément accéléré, dont nous pouvons repré-

senter l'accélération par α. Donc, si n forces égales à f agissent simultanément sur ce même mobile, puisque l'action de chacune d'elles est indépendante de celles des autres (7), elles lui imprimeront une accélération n fois plus grande, c'est-à-dire $n\alpha$. De même, si n' forces égales à f agissent simultanément sur le même mobile, l'accélération produite sera $n'\alpha$. On a donc, en désignant par γ et γ' les accélérations imprimées par F et par F', $\gamma=n\alpha$, $\gamma'=n'\alpha$, et par suite, $\frac{\gamma}{\gamma'}=\frac{n}{n'}$; on en déduit :

$$\frac{\gamma}{\gamma'}=\frac{F}{F'}.$$

Ce principe étant démontré pour le cas où les forces ont une commune mesure, quelque petite qu'elle soit, nous le considérerons par cela même comme général.

11. **Masse.** — L'équation que nous venons d'obtenir peut s'écrire :

$$\frac{F}{\gamma}=\frac{F'}{\gamma'}.$$

Or, si l'on faisait agir sur le même corps une autre force F'', le rapport de cette force à l'accélération γ'' qu'elle produirait serait encore le même ; on a donc, pour toutes les forces appliquées à un autre corps :

$$\frac{F}{\gamma}=\frac{F'}{\gamma'}=\frac{F''}{\gamma''}=\cdots=m.$$

Ce rapport constant m est ce qu'on nomme la *masse* du corps. — On appelle donc, d'une manière générale, *masse* d'un corps *le nombre constant qui exprime le rapport d'une force quelconque à l'accélération qu'elle imprime à ce corps.*

Si maintenant on considère, en particulier, parmi les forces qui peuvent agir sur un corps, celle qui résulte de l'action de la pesanteur sur lui, c'est-à-dire son poids P, et si l'on désigne par g l'accélération qu'il prend sous cette action (accélération que nous verrons être la même *pour tous les corps, en un même lieu*), on aura

$$\frac{P}{g}=m.$$

On peut donc appeler, en particulier, *masse* d'un corps, *le rapport de son poids à l'accélération qu'il prend sous l'action de la pesanteur.*

Cette expression $\frac{P}{g}$ comprend, d'une part, la quantité P, qui dépend de l'*unité de force ;* d'autre part, la quantité g, qui dépend de l'*unité de longueur* et de l'*unité de temps*, puisque l'accélération est la variation éprouvée par la vitesse dans l'unité de temps. Si, comme on le fait en Mécanique, on prend comme unité de force le *kilogramme*, comme unité de longueur le *mètre* et comme unité de temps la *seconde*, pour le corps dont la masse est l'unité, on doit avoir $P = g$. La valeur de l'accélération à Paris étant $9^{m},81$, l'unité de masse est alors la masse d'un corps dont le poids réel (dans le vide) à Paris est $9^{kil},81$.

12. **Mesure des forces constantes, par les accélérations qu'elles produisent.** — Outre l'emploi des *dynamomètres*, qui permettent de mesurer les forces par les flexions qu'elles produisent sur un ressort (8), nous avons maintenant un autre moyen de mesure, fondé sur l'observation des effets de mouvements.

Soit un corps dont on connaisse préalablement le poids P : en divisant le nombre P par le nombre g, on connaîtra la masse de ce corps, $m = \frac{P}{g}$. Dès lors, si l'on peut observer l'accélération γ qu'imprime à ce même corps la force qu'on se propose de mesurer, on aura, entre la valeur inconnue F de la force et l'accélération connue γ, la relation

$$\frac{F}{\gamma} = m,$$

d'où l'on déduira *la valeur de la force*

$$F = m\gamma.$$

COMPOSITION DES FORCES.

13. **Représentation géométrique des forces.** — Une force est complètement définie lorsqu'on donne : 1° son *point d'application*, c'est-à-dire le point sur lequel s'exerce son action ; 2° sa *direction*, c'est-à-dire la direction du mouvement qu'elle tend à imprimer à ce point ; 3° son *intensité*, c'est-à-dire sa valeur numérique, évaluée à l'aide de l'unité de force. — On représente géométriquement une force par une droite partant du point d'application, dirigée dans le sens même de la force et égale à autant de fois l'unité de longueur que la force contient de fois l'unité de force.

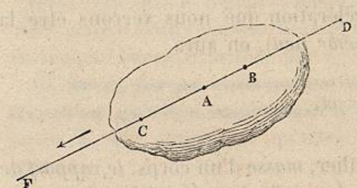

Fig. 6.

Lorsqu'une force F, appliquée en un point A d'un corps solide (*fig.* 6), le sollicite dans une direction AF, il est aisé de voir que l'on peut toujours supposer le point d'application de cette force transporté

en tout autre point C ou B du corps, situé sur la même direction, et même en un point D extérieur au corps, pourvu que l'on suppose, en même temps, ce point *lié invariablement au premier*.

14. **Composition des forces appliquées en un même point.** — On démontre que, si plusieurs forces sont *appliquées en un même point*, elles peuvent toujours être remplacées par une force unique, ou *résultante*, produisant à elle seule le même effet que toutes les autres. — Nous nous contenterons d'énoncer, sans démonstration, les règles qui permettent d'obtenir cette résultante, dans les divers cas :

1° *Deux forces appliquées en un même point et dirigées dans le même sens, ont une résultante égale à leur somme, et dirigée dans le même sens que les forces proposées ;*

2° *Deux forces appliquées en un même point, dans la même direction mais en sens contraire, ont une résultante égale à leur différence, et dirigée dans le sens de la plus grande des deux forces proposées;*

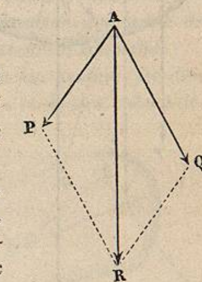

Fig 7.

3° *Deux forces* P, Q (*fig.* 7), *appliquées en un même point* A, *dans des directions différentes, ont une résultante représentée, pour sa grandeur, sa direction et son sens, par la diagonale* AR *du parallélogramme qui a pour côtés adjacents les deux forces proposées.*

Pour obtenir la résultante *d'un nombre quelconque de forces* appliquées en un même point, on composera d'abord deux de ces forces en une seule; puis, la résultante partielle ainsi obtenue, avec une troisième force; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule, qui sera la résultante du système tout entier.

15. **Composition des forces parallèles.** — 1° *Deux forces parallèles et de même sens* P, Q (*fig.* 8), *appliquées en deux points* A, B *d'un*

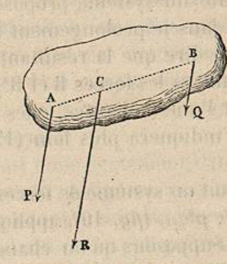

Fig. 8.

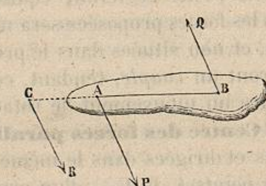

Fig. 9.

corps solide, ont une résultante R *qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens qu'elles, égale en grandeur à leur somme, et placée de manière* *que sa direction partage la droite* AB *en deux parties* AC, BC, *inversement proportionnelles aux intensités de ces forces* P *et* Q.

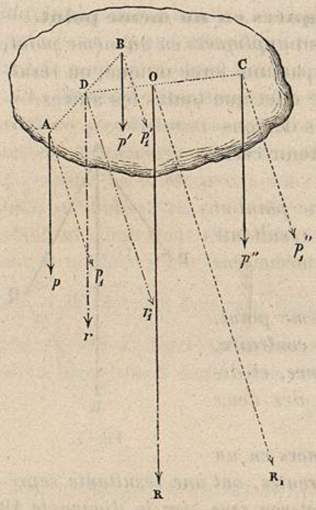

Fig. 10.

2° *Deux forces parallèles, de sens contraires et inégales*, P, Q (*fig.* 9), *appliquées en deux points* A, B *d'un corps solide, ont une résultante* R, *qui leur est parallèle, égale en grandeur à leur différence, dirigée dans le sens de la plus grande, et placée de manière que sa direction rencontre le prolongement de la droite* AB *en un point* C, *tel que les distances* AC, BC *soient inversement proportionnelles aux intensités des forces* P *et* Q.

Pour composer ensemble un nombre quelconque de forces parallèles et dirigées *dans le même sens*, p, p', p'',... (*fig.* 10), appliquées en divers points A, B, C... d'un corps solide, il suffira de composer deux de ces forces, p, p', en une seule r; puis cette résultante partielle avec une troisième force p''; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on ait réduit toutes les forces à une seule R, qui sera la résultante du système.

Si l'on a des forces parallèles, dirigées, *les unes dans un sens, les autres en sens contraire*, on composera d'abord les premières en une résultante R, qui sera dirigée dans le même sens qu'elles ; puis, les secondes, en une résultante R', qui sera dirigée en sens contraire de R. — Si ces deux forces R et R' sont inégales, elles auront une résultante égale à leur différence : ce sera la résultante du système proposé. — Si les forces R et R' sont égales et situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles se feront équilibre, c'est-à-dire que la résultante de toutes les forces proposées sera nulle. — Enfin, si les forces R et R' sont égales, et non situées dans le prolongement l'une de l'autre, elles constitueront un *couple*, tendant, comme on l'indiquera plus loin (17), à produire un mouvement de rotation.

16. **Centre des forces parallèles.** — Soit un système de forces parallèles et dirigées dans le même sens, p, p', p'',... (*fig.* 10), appliquées en des points A, B, C.... d'un corps solide. Supposons qu'on change la direction commune de ces forces (comme l'indiquent les lignes marquées en traits discontinus), sans changer, ni leurs points d'application, ni leur parallélisme, ni leurs rapports d'intensité. On voit que le point D de la droite AB, par lequel passe la première résultante r, ne

sera pas changé, puisque la position de ce point est déterminée par la relation $\frac{AD}{BD}=\frac{p'}{p}$, et ainsi de suite pour tous les points semblables, jusqu'au point O, par lequel passe toujours la résultante totale. Ce point prend alors le nom de *centre des forces parallèles*.

On appelle donc *centre des forces parallèles*, pour un système déterminé de forces parallèles et de même sens, appliquées en des points déterminés d'un corps solide, *le point par lequel passe constamment la résultante de ce système, lorsqu'on change la direction commune des forces, sans changer leur parallélisme ni leurs rapports d'intensité.*

17. **Couples.** — On donne le nom de *couple*, à un système de deux forces parallèles, P, P' (*fig.* 11), de sens contraires et *égales entre elles*, appliquées en deux points différents A, B d'un corps solide, et ayant une direction différente de celle de la droite AB qui joint leurs points d'application. Un pareil système ne peut être remplacé par une résultante; il tend à imprimer au corps un mouvement de rotation.

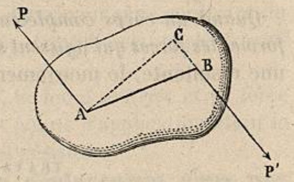

Fig. 11.

On appelle *bras de levier* d'un couple, la longueur AC de la perpendiculaire commune aux deux forces. — On appelle *moment* du couple, le produit du nombre qui exprime la mesure de l'une des forces P, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier AC.

On démontre qu'un couple doit être considéré comme ayant pour mesure *son moment*. — Il faut entendre par là que, si l'on prend pour unité le couple qui a pour force l'unité de force et pour bras de levier l'unité de longueur, le nombre qui exprime la mesure d'un couple quelconque est égal au produit du nombre qui exprime la mesure de la force, par le nombre qui exprime la mesure du bras de levier.

18. **Composition des forces de directions quelconques, appliquées en des points différents d'un corps.** — On démontre que des forces en nombre quelconque, appliquées en divers points d'un corps, suivant des directions quelconques, peuvent toujours se réduire *à un couple et à une force non située dans le plan du couple.*

C'est donc seulement dans certains cas particuliers, qu'un système de forces appliquées à un même corps peut se réduire, soit simplement à un couple, soit simplement à une force. — On a vu, par exemple, que des forces appliquées *en un même point* peuvent toujours être remplacées par une force unique (14). Il en est de même quand les forces, appliquées en des points différents d'un corps, ont des directions *concourantes*, c'est-à-dire quand leurs directions passent par un même point; en effet, on peut alors les considérer comme appliquées toutes à ce point de concours (13); par suite, on peut toujours les composer en une force unique, passant par ce point.

19. **Équilibre.** — Lorsque des forces, agissant simultanément sur un corps complètement libre, se neutralisent de manière à ne pouvoir pas produire de mouvement, on dit *qu'elles se font équilibre*.

Ainsi, deux forces égales et de sens contraires, appliquées en un même point, se font évidemment équilibre. — Il en est de même quand deux forces égales sont appliquées en deux points différents d'un corps solide, et agissent en sens contraire, dans la direction même de la droite qui joint ces deux points.

On démontre que, *toutes les fois que des forces se font équilibre sur un corps complètement libre, chacune d'elles peut être considérée comme égale et directement opposée à la résultante de toutes les autres.*

Quand un corps complètement libre est animé d'un mouvement uniforme, les forces qui agissent sur lui se font équilibre; car, si elles avaient une résultante, le mouvement serait varié.

TRAVAIL. — FORCE VIVE.

20. **Travail d'une force, pour un déplacement déterminé de son point d'application.** — Lorsqu'un corps, soumis à l'action d'une force, éprouve un déplacement, on dit, en général, qu'il y a un *travail* effectué. — Pour évaluer la grandeur de cet effet, on doit tenir compte, non seulement de la grandeur de la force, mais aussi de la grandeur du déplacement de son point d'application. C'est ce que nous allons montrer par un exemple.

Considérons un corps ayant pour poids 1 kilogramme, et soulevons-le verticalement, d'un mouvement uniforme, à 1 mètre de hauteur; d'après ce qu'on vient de voir (19), la force musculaire nécessaire et suffisante est de 1 kilogramme (*); le travail effectué par cette force est *l'unité de travail* adoptée en Mécanique; on l'appelle kilogram-

(*) En réalité, pour mettre ce corps en mouvement, il faudra, pendant un intervalle de temps très court θ, lui appliquer une force un peu plus grande $1+\varepsilon$. L'excès ε de la force musculaire sur le poids, agissant de bas en haut pendant le temps θ, augmentera la vitesse de zéro à v. — Au bout du temps θ, la force musculaire n'étant plus que 1 kilogramme, le mouvement deviendra uniforme et le corps conservera la vitesse v. — Un peu avant que le corps ait parcouru 1 mètre, pour le ramener au repos, on ne lui appliquera plus, pendant le même intervalle de temps θ, qu'une force musculaire un peu moindre $1-\varepsilon$; l'excès ε du poids sur la force musculaire, agissant maintenant de haut en bas, diminuera la vitesse, au bout du temps θ, de v à zéro. — Quand on considère le corps comme constamment soumis à une force musculaire de 1 kilogramme, on néglige les petites variations que doit éprouver cette force, au début et à la fin du mouvement, variations qui sont nécessaires pour amener le corps de l'état de repos à l'état de mouvement uniforme, ou de l'état de mouvement à l'état de repos.

mètre. Or, si l'on veut soulever verticalement, d'un mouvement uniforme, à 1 mètre de hauteur, un corps dont le poids est P kilogrammes, la force musculaire développée doit être P fois plus grande; le travail effectué sera P kilogrammètres. — Enfin, si le même corps, pesant P kilogrammes, est soulevé à une hauteur de h mètres, le travail effectué sera encore h fois plus grand, c'est-à-dire qu'il aura pour mesure, en kilogrammètres, le produit des deux nombres P et h; on aura, en représentant ce travail par W,

$$W = Ph.$$

21. **Travail moteur. Travail résistant.** — Dans l'exemple que nous venons de choisir, la force musculaire, qui est dirigée dans le sens du déplacement, est dite *motrice*, et son travail est dit *moteur*. D'autre part, le poids du corps, qui est une force dirigée en sens contraire du déplacement, est la force *résistante;* son travail est appelé *travail résistant.*

Tant que le mouvement est uniforme, la force motrice et la force résistante sont égales; le déplacement des points d'application étant le même, le travail moteur est égal au travail résistant.

22. **Travail d'une force, pour un déplacement dans une direction autre que celle de la force.** — Si le mobile A, soumis à l'action de la force F (*fig.* 12), se déplace suivant AB, on peut remplacer la force F par deux composantes, dont l'une, F″, serait dirigée perpendiculairement au déplacement, et l'autre, F′, dans la direction du déplacement lui-même. La première n'a évidemment aucun effet sur le mouvement effectué; la force F′ est la seule dont on doive considérer l'action. On prend alors, comme travail de la force considérée, le travail de la *composante efficace.* Si e désigne l'espace parcouru AB, l'expression du travail sera F′e.

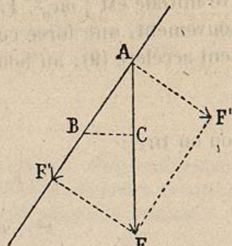

Fig. 12.

Désignons par α l'angle BAF et par z la projection AC du déplacement AB sur la direction de la force; on a les égalités :

$$F' = F \cos \alpha \qquad e = \frac{z}{\cos \alpha};$$

l'expression du travail est donc :

$$W = F'e = Fz.$$

Le travail a donc encore pour mesure le produit de la force (supposée constante en grandeur et en direction) par la projection du déplacement sur la direction de la force.

Ce résultat subsiste encore si le mobile se déplace suivant une ligne brisée ABCD (*fig.* 13). Les travaux de la force F pendant ces déplacements successifs sont :

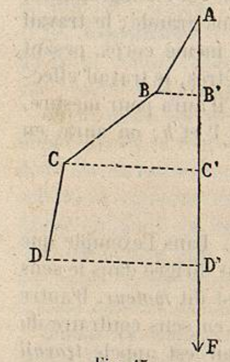

Fig. 13.

$$F \times AB', \quad F \times B'C', \quad F \times C'D';$$

Par suite, le travail total $F \times AD'$ est *indépendant de la trajectoire suivie*, entre le point A et un point quelconque de la droite DD′.

Dans le cas actuel, le mobile se déplaçant du point A au point D, le travail de la force F est *moteur;* on le compte positivement. — Si le mobile se déplaçait en sens inverse, suivant DCBA, le travail de la force F serait *résistant;* on le compterait négativement.

23. Force vive. — Principe des forces vives. — On désigne sous le nom de *point matériel* un corps, de masse m, dont les dimensions sont tellement petites qu'on peut l'assimiler à un point géométrique. On appelle *force vive* d'un point matériel, le demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse $\frac{1}{2}mv^2$. Cette expression est constamment positive.

Soit un point de masse m, animé d'une vitesse initiale v_0; sa force vive initiale est $\frac{1}{2}mv_0^2$. Faisons agir sur ce point, dans le sens de son mouvement, une force constante F; le mouvement devient uniformément accéléré (9); au bout du temps t, la vitesse est devenue :

$$v = v_0 + \gamma t;$$

d'où on tire :

$$v - v_0 = \gamma t, \qquad v + v_0 = 2v_0 + \gamma t,$$

$$v^2 - v_0^2 = 2\gamma\left[v_0 t + \frac{\gamma t^2}{2}\right] = 2\gamma e.$$

L'accroissement de la force vive $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ est donc égal à $m\gamma e$, c'est-à-dire au produit Fe, qui mesure le travail moteur de la force pendant l'intervalle de temps considéré.

Si la force F était résistante, c'est-à-dire dirigée en sens inverse du mouvement du mobile, le mouvement serait uniformément retardé, la vitesse v serait plus petite que la vitesse initiale, et la diminution de la force vive serait égale au travail résistant de la force pendant l'intervalle de temps considéré.

On démontre, en Mécanique, le théorème général suivant : Quand un système solide, formé d'un nombre quelconque de points matériels, est animé d'un mouvement quelconque, *pendant un intervalle de temps déterminé, la somme algébrique des travaux de toutes les forces appliquées aux différents points du système est égale, en grandeur et en signe, à la variation de la somme des forces vives de tous les points pendant ce même temps.* — C'est l'énoncé connu sous le nom de *principe des forces vives*, principe dont nous admettrons la généralité.

24. Transmission du travail dans les machines. — Une machine simple (levier, treuil) est un corps solide, assujetti à une liaison déterminée, et auquel sont appliquées deux forces non directement opposées, la *puissance* et la *résistance*.

Dans la plupart des cas, la machine sert à utiliser le travail qui correspond à un déplacement du point d'application de la puissance, pour produire un déplacement du point d'application de la résistance. Les travaux correspondants à ces deux déplacements sont toujours égaux en valeur absolue : c'est ce que nous allons montrer, en prenant comme exemple le levier.

Le *levier* est une barre rigide AB, mobile autour d'un point O (*fig.* 14); la fixité du point O constitue la liaison. — La résistance appliquée au point B est, par exemple, le poids d'un corps pesant, que l'on veut soulever au moyen d'une force musculaire, la puissance, appliquée au point A. Supposons le levier au repos : la résultante des deux forces P et R doit passer par le point d'appui; elle a pour effet d'appuyer le levier sur son point fixe, et développe une force égale et directement opposée, la *réaction* du point d'appui ; c'est la force de liaison. On doit donc avoir (15) :

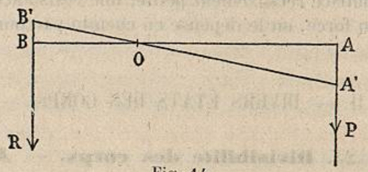

Fig. 14.

$$\frac{P}{R} = \frac{OB}{OA}.$$

L'équilibre subsiste encore quand la machine est animée d'un mouvement uniforme (19). Au bout d'un intervalle de temps déterminé, le levier occupera la position A′B′; la similitude des triangles AOA′, BOB′, donne la relation :

$$\frac{OB}{OA} = \frac{BB'}{AA'},$$

qui, combinée avec l'égalité précédente, donne :

$$P \times AA' = R \times BB'.$$

Le travail moteur de la puissance $P \times AA'$ est donc égal au travail résistant $R \times BB'$. — Il en est ainsi dans toute machine en mouvement uniforme; nous en rencontrerons d'autres exemples.

L'égalité du travail moteur et du travail résistant, dans une machine en mouvement uniforme, est une conséquence du principe des forces vives. En effet, les différents points qui constituent la machine ont une force vive constante; donc la somme algébrique des travaux des forces est nulle. D'autre part, le travail de la force de liaison est nul, puisque son point d'application est fixe ; donc le travail positif de la puissance est égal, en valeur absolue, au travail négatif de la résistance.

Une *machine composée* est un système dont les divers organes sont des machines simples ; telle est la machine à vapeur. — Généralement, le mouvement est périodique ; c'est-à-dire que, au bout d'un intervalle de temps appelé période, les différents points de la machine reprennent les mêmes positions relatives et sont animés de la même vitesse. Au commencement et à la fin de la période, la force vive totale reprend la même valeur ; la somme algébrique des travaux des forces est nulle, c'est-à-dire que le travail moteur positif et le travail résistant négatif sont égaux en valeur absolue pendant la durée de la période. Dans la première partie de la période, le travail moteur est plus grand que le travail résistant, la force vive de la machine augmente ; à la fin de la période, la force vive diminue, le travail résistant est supérieur au travail moteur.

Une machine, simple ou composée, ne crée donc pas de travail ; l'avantage d'une machine est essentiellement de permettre de vaincre, avec une force motrice relativement petite, une résistance considérable ; mais ce qu'on gagne en force, on le dépense en chemin parcouru.

II. — DIVERS ÉTATS DES CORPS. — DIVERS ÉTATS DE L'ÉNERGIE

25. **Divisibilité des corps. — Atomes. — Molécules.** — Les corps, en général, peuvent être divisés en parties de plus en plus petites, sans perdre les propriétés qui les caractérisent. — Cependant, bien que l'on puisse diviser la matière en parties d'une petitesse extrême, l'étude des propriétés des corps a conduit à admettre que chacun d'eux est formé *d'atomes* (ἀ négatif, τεμνω couper) c'est-à-dire de particules insécables, disposées par groupes, chaque groupe constituant une *molécule* (diminutif de *moles*, masse).

On doit se représenter ces molécules comme ayant des dimensions tellement petites, qu'elles échapperont toujours à nos regards, même avec le secours des microscopes les plus puissants. Le physicien anglais Williams Thomson a été conduit par le calcul à cette conclusion, que si on pouvait voir une goutte d'eau avec un grossissement tel, qu'elle apparût avec la grosseur de la Terre, ses molécules n'acquerraient encore que des dimensions comparables à celles de grains de sable.

On admet que les molécules ne sont pas en contact les unes avec les autres, mais qu'elles sont séparées par des intervalles appelés *pores*, dont les dimensions sont comparables à celles des molécules elles-mêmes. — Cette hypothèse permet, par exemple, de se rendre compte des propriétés suivantes : 1° tous les corps éprouvent une *diminution de volume* quand on exerce sur eux une *pression* suffisante ; 2° tous les corps éprouvent une *variation* de *volume* quand on fait varier leur *température*. Ces variations de volumes s'expliquent par les variations de grandeur des intervalles qui existent entre leurs molécules.

26. **Corps simples. — Corps composés.** — Pour certaines substances, nous savons effectuer la division de deux façons bien distinctes. — Une goutte d'eau, réduite en gouttelettes de plus en plus fines, fournit toujours des parties ayant les propriétés de l'eau. — Au contraire, en soumettant l'eau à l'action d'un courant électrique, on la décompose en deux gaz (l'oxygène et l'hydrogène), dont les propriétés n'ont plus rien de commun avec celles de l'eau. — Ce dernier mode de division est donc essentiellement distinct de la division mécanique. Il est naturel d'admettre que chaque molécule d'eau est formée d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, qui se séparent sous l'influence de l'électricité.

Parmi les corps connus, il en est qu'on n'a jamais pu décomposer en éléments différents ; tels sont l'hydrogène, l'oxygène, le fer, etc... ; on les nomme *corps simples ;* leurs molécules sont formées d'atomes tous identiques. — L'eau est, au contraire, un corps *composé*.

27. **But de la Physique.** — Que des corps simples s'unissent pour former un corps composé, ou que les éléments d'un corps composé se séparent, la quantité de matière n'est pas modifiée ; il n'y a de changé que le mode de groupement des atomes. — La loi de l'*indestructibilité de la matière* a été posée par Lavoisier.

Le but essentiel de la *Chimie* est l'étude des conditions particulières dans lesquelles les atomes de diverses natures s'unissent entre eux ou se séparent les uns des autres.

La *Physique*, au contraire, étudie les phénomènes qui se produisent sans que la constitution intime des corps soit modifiée.

28. **États physiques des corps.** — Les divers états physiques sous lesquels les corps se présentent à nous peuvent se rapporter à trois types : *l'état solide*, *l'état liquide* et *l'état gazeux*.

1° *État solide*. — Nous appellerons *état solide*, celui d'un corps dont *le volume et la forme demeureraient constants*, quelque grandes que fussent les forces qui lui seraient appliquées.

Les corps qu'on appelle vulgairement *corps solides*, et sur lesquels peuvent porter nos expériences, ne sont jamais rigoureusement conformes à cette définition ; quand on soumet un corps solide à des actions mécaniques, comme des pressions ou des tractions énergiques, il éprouve en général une déformation plus ou moins sensible. Mais, dès que ces actions cessent de s'exercer, il revient à sa forme primitive, pourvu que la déformation n'ait pas été trop grande. — On appelle *élasticité*, la propriété en vertu de laquelle les corps, momentanément déformés par des actions extérieures, tendent à reprendre leur forme primitive dès que ces actions sont supprimées (*).

(*) L'acier trempé possède une grande élasticité : nous voyons chaque jour des ressorts d'acier se courber sous l'action des pressions qu'ils éprouvent, et reprendre leur forme quand ces pressions cessent. — Le plomb, au contraire, est à peu près dénué