

Évolution de la notion de travail

par Jacques DUBOIS,
Lycée Paul-Louis-Courier (Tours).

Cet exposé a été présenté par son auteur d'une part au nom de l'Union des Physiciens lors des « Journées Interdisciplinaires de la Formation Continue » d'Orléans en décembre 1984, d'autre part aux stagiaires de physique lors d'une des deux journées consacrées par le C.P.R. d'Orléans-Tours à l'Histoire des Sciences, en 1986, à l'initiative de M. R. Brun, I.P.R.

Il constitue surtout une chronologie et a servi d'abord à sensibiliser les collègues à l'Histoire des Sciences ; on en trouvera le développement dans l'ouvrage : « Histoire de la Physique », Tome 1 (C. Blondel, J. Dubois, H. Gié, J.-P. Mathieu, J. Rosmorduc, M. Saillard), Edition : Lavoisier. Technique et Documentation, dans le chapitre que j'ai consacré à « La Constitution de la Mécanique Rationnelle ».

Un exemple d'étude pouvant aider au recyclage des physiciens en Histoire des Sciences est la recherche de l'émergence des concepts de *travail* et d'*énergie mécanique*, de l'Antiquité au XIX^e siècle. On y verra la quête d'un invariant, produit de deux grandeurs, qui au départ se confondra avec le *moment statique*, de même que *quantité de mouvement* et *énergie cinétique* ne se distingueront qu'avec Huygens et Leibniz, les lois de conservation n'arrivant que tardivement sous leur forme correcte.

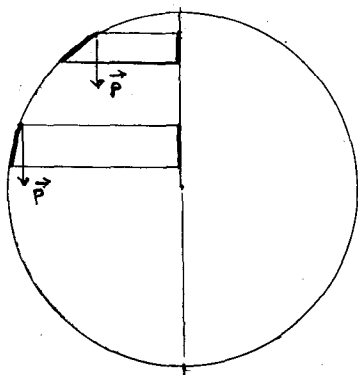
Aristote (350 av. J.-C.) et ses commentateurs expriment déjà une règle de *conservation* dans les « *Questions Mécaniques* » : en appelant *puissance* le produit du poids par la vitesse, on constate que, dans une machine simple, si les poids sont en raison inverse des bras de levier, comme les vitesses sont proportionnelles aux bras, les puissances s'équilibrent. Il s'agit donc déjà d'une espèce de « *principe des vitesses virtuelles* », mais les déplacements ne sont pas nécessairement infiniment petits...

L'idée va d'ailleurs faire son chemin car le géomètre arabe Thabit ibn Kurrah, commentant un ouvrage grec appelé « *Liber charastonis* » (du moins dans sa traduction latine), écrit :

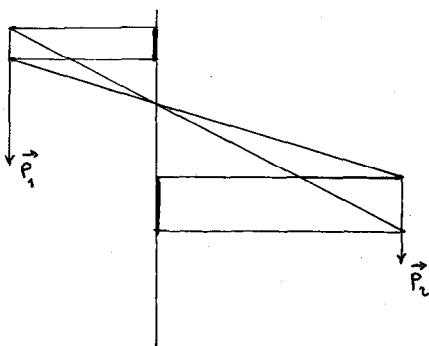
« Si deux mobiles parcourent deux espaces différents en un même temps, le rapport de l'un de ces espaces à l'autre est le même que le rapport de la puissance qui meut le premier mobile à la puissance qui meut le second... » et à propos du levier : « La vertu motrice de l'extrémité B du levier est donc à la vertu motrice de l'extrémité A comme les deux chemins que ces points décrivent en un même temps, c'est-à-dire comme l'arc BD est à l'arc AF » (1).

A partir d'Archimède (250 av. J.-C.) va apparaître la notion de *moment* ; c'est d'abord le *moment statique* : la force multipliée par le bras de levier (qui a d'ailleurs la dimension d'un travail). On trouve en outre cette notion de moment dans Euclide (300 av. J.-C.) et dans les Mécaniques de Héron d'Alexandrie (100 av. J.-C.). Mais, comme l'a dit Mach, les démonstrations de l'équilibre du levier n'en sont pas, car on *postule* toujours l'équilibre du levier symétrique, pour des poids égaux dont on ne définit pas l'égalité. Plus généralement, on admet par intuition expérimentale que l'effet d'un poids se traduit par un produit $p \times l$.

Au XIII^e siècle va apparaître, avec Jordanus de Némore, la *pesanteur relative à la situation* (*gravitas secundum situm*). Jordanus a l'idée de projeter les déplacements sur la verticale et de démontrer l'équilibre du levier en mesurant l'effet d'un poids au moyen du produit de sa grandeur par le trajet effectué sur la verticale : c'est bien ici un *travail*.

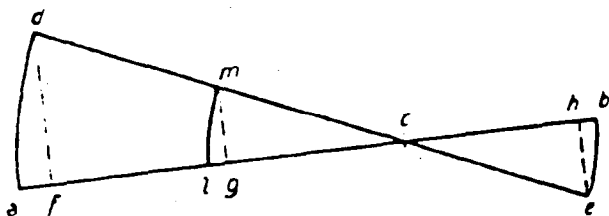


La gravité « secundum situm » augmente quand le poids descend.



La gravité « secundum situm » reste la même pour p_1 et p_2 .

(1) Cité par E. JOUGUET. *Lectures de Mécanique*. T. I., p. 57.



« Soient acb le fléau, a et b les poids qu'il porte et supposons que le rapport de b à a soit celui de ca à cb . Je dis que la règle ne changera pas de place. Mettons en effet qu'elle descende du côté b et prenne la position dce ; b descendra de he et a montera de fd . Si l'on plaçait en l , à la distance $cl = cb$, un poids égal au poids b , il monterait, dans ce mouvement, de $gm = he$. Mais il est évident que df est à mg comme le poids l au poids a . Dès lors, ce qui suffit à amener a en d suffirait à amener l en m . Mais nous avons montré que b et l se contrebalancent exactement ; donc le mouvement supposé est impossible et il en serait de même du mouvement en sens inverse ».

Ce point de vue va être utilisé par le Disciple inconnu de Jordanus (que Duhem appelle le précurseur de Léonard de Vinci) : il va l'appliquer au levier coudé et au plan incliné.

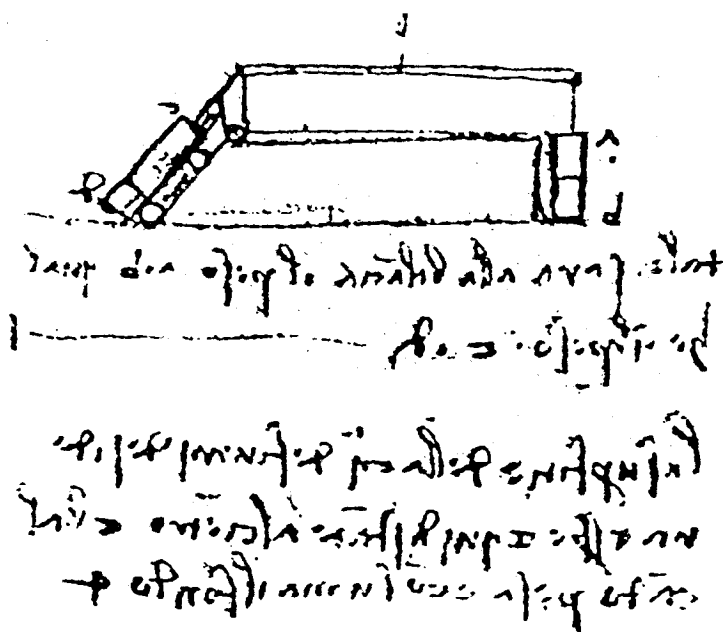


La pesanteur relative à la situation est toujours la même, pour une pente donnée, tout le long du plan incliné, et il suffit que les poids soient dans le rapport des côtés ou dans le rapport inverse des pentes pour réaliser l'équilibre.

Peut-on dire qu'il s'agit déjà de la notion de travail ? Francis Halbwachs, qui a réfuté ce point de vue (à propos de Stevin...), pense que l'on a simplement des *rapports* de proportionnalité, et non une entité $F \times d$ invariante.

Au xiv^e siècle, Buridan et Nicole Oresme font de la dynamique et inventent l'*impetus* : le projectile a emporté quelque chose du lanceur, qui lui permet de continuer son mouvement. Cet *impetus* est-il l'ancêtre de la *quantité de mouvement* ou de l'*énergie cinétique* ? Cela va rester bien vague au cours des siècles, jusqu'à la querelle des forces vives.

Avec Nicolas de Cues et Léonard de Vinci, au xv^e siècle, l'*impetus impressus* et l'*impeto* ressemblent un peu à un élan



Léonard de Vinci : Manuscrit H 81 verso. « Tel sera à la balance le poids ab que lui est le poids cd ». (Traduction C. Ravaisson-Mollien).

Ce dessin montre bien que le poids qui fait équilibre et le poids glissant sur le plan incliné sont dans le même rapport que la hauteur et la longueur du plan.

vital que l'on communique au corps : théorie *animiste* plus métaphysique que physique... cependant Léonard de Vinci semble avoir correctement écrit l'équilibre du plan incliné.

En outre, il reprend l'idée du *principe du travail virtuel* déjà rencontrée : « ... Plus une force s'étend de roue en roue, de levier en levier ou de vis en vis, plus elle est puissante et lente... »

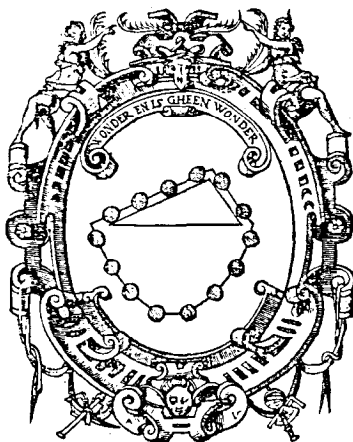
Dans les moufles, les puissances que les cordes interposées entre les parties reçoivent de leur moteur sont entre elles dans la même proportion que celle qu'il y a entre les vitesses de leurs mouvements.

La proportion qu'a le mouvement du moteur des poulies avec le mouvement du poids élevé par les poulies sera celle qu'a le poids élevé par ces poulies avec le poids du moteur » (2).

Au ^{xvi}^e siècle, Guido Ubaldo, pour l'étude des machines simples, préfère considérer les *déplacements* virtuels plutôt que les vitesses virtuelles.

Nous arrivons au début de la mécanique quantitative avec Stevin. En 1608 il fait la célèbre figure :

S I M O N S T E V I N
van Brugghe.



TOT LEYDEN,
Inde Druckerye van Christoffel Plantij
By François van Raphelinghen.

Le système est en équilibre : *impossibilité du mouvement perpétuel* (intuition géniale ou fruit du bon sens, ou encore résultat d'une expérience ancestrale ?) On peut supprimer la partie inférieure de la chaîne sans changer l'équilibre. Les poids des boules équidistantes sont donc dans le rapport des longueurs des plans, ou encore dans le rapport inverse des pentes. Etudiant l'équilibre des systèmes de *poulies*, Stevin énonce : ce que l'on gagne en force, on le perd en déplacement. Est-ce déjà la *conservation du travail*, ou plutôt, comme le pense F. Halbwachs, l'énoncé d'une simple proportion ?

(2) Cité par E. JOUGUET. *Lectures de Mécanique*. T. I., p. 58.

Képler, dans ses *Harmonices mundi*, représente la puissance par : poids $\times$ hauteur parcourue en un temps donné, et d'autre part semble être le premier, en 1609, à utiliser correctement le mot *énergie* : parlant de deux aspects de la lumière, il écrit : « duo etiam existunt hujus energiae respectus in luce » (deux aspects de la lumière qui sont de l'énergie...).

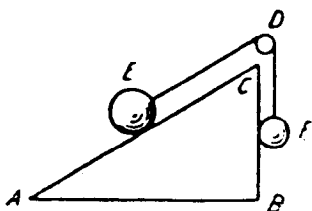
Le terme *travail*, lui, est employé pour la première fois, semble-t-il, à bon escient, par Salomon de Caus en 1615, dans un curieux ouvrage intitulé : « *Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes auxquelles sont adjoints plusieurs desseings de grottes et fontaines, par Salomon de Caus, ingénieur et architecte de son Altesse Palatine Electorale* » (fig. 1).

Avec Galilée on va retrouver précisées ces notions aussi bien en statique qu'en dynamique.

L'équilibre sur le plan incliné est résolu de deux façons :

- en retenant le corps par un levier et en comparant l'équilibre des poids à celui du levier ;
- en remarquant que les poids sont dans un rapport tel que le produit de leur valeur par la dénivellation reste constant : d'où la notion de *travail*.

« Imaginons que dans le triangle ABC, la ligne AB représente le plan horizontal, la ligne AC le plan incliné, dont la hauteur sera mesurée par CB. Sur le plan AC est posé un mobile E qui est attaché à la corde EDF ;



celle-ci porte en F un poids ou une force qui est à la gravité du poids E dans le même rapport que la ligne BC à la ligne CA. Si le poids F vient à descendre, tirant le mobile E sur le plan incliné, le mobile E parcourra suivant la ligne AC un chemin égal à celui que le grave F décrit dans sa chute. Mais il faut observer ceci : il est vrai que le mobile E aura parcouru toute la ligne AC dans le temps que le poids F aura mis à s'abaisser d'une égale longueur ; mais, pendant ce temps le mobile E ne se sera pas éloigné du centre commun des choses graves d'une longueur

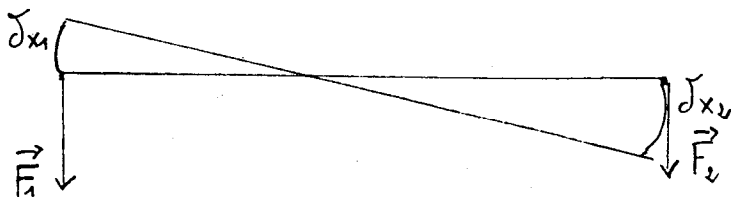
supérieure à la verticale BC , tandis que le poids F , descendant selon la verticale, se sera abaissé d'une longueur égale à toute la ligne AC . Or les graves ne résistent à un mouvement oblique que dans la mesure où ils s'éloignent du centre de la terre... Nous pouvons dire à juste titre que le voyage de la force F garde au voyage de la force E le même rapport que la longueur AC à la longueur CB , partant que le poids E au poids F . »

En outre, Galilée entend par *momento* aussi bien le moment statique que le produit du poids par la projection du déplacement sur la verticale, ou encore le produit de la force par la vitesse virtuelle ; mais c'est cette dernière forme qu'il privilégie et aussi bien dans les « *Mécaniques* » (1634) que dans le « *Discours sur deux nouvelles sciences* » (1638), il préfère la correspondance entre force et vitesse plutôt qu'entre force et chemin parcouru (3).

Notons enfin qu'il fait du principe des vitesses un corollaire des lois de l'équilibre plutôt qu'un fondement de ses démonstrations.

En dynamique, Galilée écrit que les degrés de vitesse acquis sur des plans diversement inclinés sont égaux lorsque les hauteurs des plans le sont et, comme dans la chute libre, le carré de la vitesse acquise est proportionnel à la hauteur de chute. Il imagine la vérification expérimentale avec la célèbre expérience du pendule qui heurte un clou, et là, *momento* est synonyme d'*impeto*, et doit correspondre à l'énergie acquise pendant la chute.

(3) Disons d'ailleurs que le principe des vitesses virtuelles est analogue au théorème des moments :



Si les forces sont en raison inverse des bras du levier,

$$F_1 \delta x_1 = F_2 \delta x_2.$$

Si δt est la durée du déplacement virtuel,

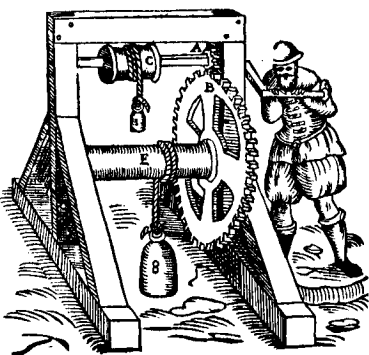
$$v_1 = \frac{\delta x_1}{\delta t} \quad \text{et} \quad v_2 = \frac{\delta x_2}{\delta t}, \quad F_1 v_1 \delta t = F_2 v_2 \delta t \quad \text{et} \quad F_1 v_1 = F_2 v_2.$$

Encore faut-il que les déplacements soient infiniment petits, compatibles avec les liaisons et qu'il n'y ait pas de frottement : avec une convention algébrique, on a le *théorème des travaux virtuels*.

THEOREME XV.

Aux roues dentelees, si vn pignon fait 8. tours, pour faire mouvoir vne roue dentelee vn tour, & que l'axe de ladite roue soit en diametre comme ledit pignon, ladite axe leuera 8. fois autant que ledit pignon.

Les roues dentelees se font encotes avec la mesme raison comme les precedentes, car en augmentant la force, lon augmente proportionnellement le temps, comme par exemple, soit une machine à leuer fardeaux, faite en telle sorte qu'un pignon marqué A. puisse tourner vne grande roue dentelee, marquée B. ledit pignon aura 6. dents, & la grande roue 48. ainsi il faudra que ledit pignon face 8. tours cōtre la grande roue vn, tellement que si vne liure est pendue à l'axe C. elle fera esgalement balancee à 8. liures pendues à l'axe E. moyennant que lesdites axes soyent de pareille grosseur, ainsi quand lon voudroit tirer 400.



B 3 liures

liures avec ladite axe E. ils ne donneroyent non plus de travail à tirer que 50. liures seroyent à l'axe C. aussi le pois monte 8. fois autant en l'axe C. comme il feroit estant en l'axe E. tellement qu'un homme seul, fera autant de force tirant vn fardeau par ceste machine comme huit hommes feroient ayant chacun vn axe C. mais aussi si les huit hommes sont vne heure à leuer leur pois, l'homme seul fera huit heures à leuer le sien.

Fig. 1. — Salomon de Caus. « *Les raisons des forces mouvantes* ». Curieux ouvrage où l'on emploie pour la première fois, semble-t-il, le terme « *travail* » à bon escient (ils ne donneroyent non plus de *travail* à tirer...).

Plus tard Wallis, en 1670, reprendra le principe des vitesses virtuelles et, comme Galilée, il appellera *momentum* le produit du poids par la vitesse.

On retrouve l'évocation des *travaux virtuels* avec Roberval, en 1636, dans l'étude de la composition des forces : « Quand le poids est soutenu par deux puissances, il ne peut ni monter ni descendre que la proportion réciproque des chemins avec le poids et les puissances ne soit changée... » (Reproduit par Mersenne dans : « *Harmonie universelle* »).

Descartes, à la différence de Galilée, prend comme fondement de sa théorie le même principe que Jordanus : « Ce qui suffit à élever un poids 1 d'une hauteur *l* suffit aussi pour élever un

poids k d'une hauteur $\frac{l}{k}$ ».

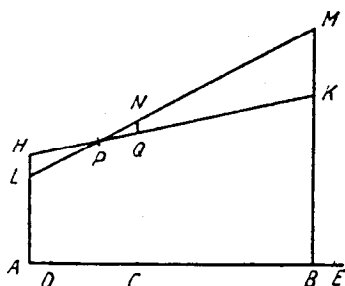
Par ailleurs, il est le premier à énoncer clairement l'égalité des travaux moteurs et résistants dans les machines simples ; utilisation rigoureuse du principe des travaux virtuels ? Oui en ce qui concerne le caractère infinitésimal, non pour le caractère algébrique. En outre, il distingue vitesses virtuelles et *déplacements virtuels* (1638), et, comme Guido Ubaldo, montre que pour l'équilibre la vitesse n'a rien à y faire.

Pour lui, enfin, le mot force a deux significations : « La force dont j'ai parlé a toujours deux dimensions, et non force qui sert en chaque point à soutenir un poids, laquelle n'a jamais qu'une dimension ».

Avec Huygens (1669), la notion de travail va retrouver celle d'énergie mécanique à propos du problème des *chocs* : il suppose que les vitesses horizontales de deux corps qui se rencontrent ont été acquises par des chutes verticales qui sont proportionnelles aux carrés des vitesses.

« *Proposition VIII.* — Si deux corps, se déplaçant en sens inverse, viennent se choquer avec des vitesses en raison inverse de leurs grandeurs, chacun rebondit avec la même vitesse qu'il avait avant le choc.

» Soient deux corps A et B qui viennent se choquer ($A > B$). Supposons que la vitesse BC du corps B soit à la vitesse AC du corps A comme la grandeur A à la grandeur B . Nous voulons montrer qu'après le choc A sera réfléchi avec la vitesse CA , B avec la vitesse CB . Si cela est vrai de A ,



ceci est vrai de B (conservation de la vitesse relative). Supposons que A soit réfléchi avec une vitesse $CD < CA$. B rebondira avec la vitesse $CE > CB$ et $DE = AB$. Imaginons que A ait acquis sa première vitesse AC en tombant de la hauteur HA , et qu'il ait ensuite changé son mouvement vertical en mouvement horizontal de vitesse AC ; de même, supposons que B ait acquis sa vitesse BC en tombant de la hauteur KB . Ces hauteurs sont en raison doublée des vitesses, c'est-à-dire que $\frac{HA}{KB} = \left(\frac{CA}{CB}\right)^2$.

Ainsi Huygens relie-t-il *énergie de mouvement* et *énergie due à la hauteur*, et dans la généralisation il constate que la somme des produits de la grandeur de chaque corps multipliée par le carré de sa vitesse est toujours le même avant et après la rencontre : il y a donc conservation de la « *force vive* », et ici Huygens est le précurseur de Leibniz.

Si, avec Newton (1687), les considérations énergétiques s'estompent, on trouve cependant des notions quantitatives assez détaillées sur la *force* : pour Képler la force est la cause du mouvement, pour Galilée elle est la cause de l'accélération ; Newton, lui, distingue la force d'inertie, la force imprimée par un choc ou une pression, la *force centripète* (la quantité motrice obéit à la relation fondamentale de la dynamique). La notion de force est distincte de celle de masse (par la suite l'une servira à définir l'autre).

A partir de là, on va se douter que la « *force des corps en mouvement* », comme on disait alors, dépend d'un certain nombre de paramètres et que certaines fonctions de ces paramètres doivent rester constantes ; autrement dit « la constance de l'énergie totale ne peut avoir lieu que moyennant certaines relations entre les variations des énergies particlles » (4).

C'est à propos de « *l'estimation des forces* » que va commencer à la fin du XVII^e siècle une querelle portant sur l'énergie mécanique, connue sous le nom de « *querelle des forces vives* ».

Leibniz ouvre le feu en 1686 : la « *vis motrix* » ne se mesure pas par la quantité de mouvement de Descartes, mais par l'effet qu'elle peut produire : un corps d'une livre qui tombe de 4 aunes acquiert la même force (énergie) qu'un corps de 4 livres qui tombe d'une aune, mais sa quantité de mouvement est double...

Dans un choc élastique, ce qui se conserve c'est la *force vive* mv^2 et non la quantité de mouvement scalaire (mais il reconnaît la conservation de la « quantité de progrès » $\sum \vec{mv}$).

On peut comprendre avec E. Jouguet (cité par F. Halbwachs) que Leibniz avait senti qu'il y avait deux voies pour évaluer l'effet « intégral » d'une force, soit en intégrant sur le temps, soit en intégrant sur l'espace. Il y a deux manières de former « *une infinité d'impressions continuées de la force morte* » (autrement dit d'intégrer) ; mais s'il conçoit que l'impulsion (*nisus*) de la force (qu'il appelle *morte*) au niveau élémentaire donne par intégration sur le temps la quantité de mouvement (*impetus*), il ne sait pas, en intégrant sur l'espace, à quoi correspond la force

(4) Cité par E. JOUGUET. *Lectures de Mécanique*. T. I., p. 112.

vive mv^2 : il ne voit pas ce que représente d (mv^2) car il n'a pas la notion de *travail élémentaire*...

Par ailleurs, les détracteurs de Leibniz vont lui rétorquer que si le corps qui tombe de 4 aunes double sa vitesse, il double aussi la durée de chute, donc l'effet reste le même...

Jean Bernoulli, au XVIII^e siècle, va défendre Leibniz, et la querelle va opposer les détracteurs, comme les cartésiens et Mac Laurin, aux défenseurs de la force vive, comme S'Gravesande, Kœnig et même M^{me} Du Chatelet et Voltaire.

Notons que Jean I Bernoulli, dans une lettre adressée à Varignon en 1717, généralise le principe des travaux virtuels en le traitant *algébriquement* et en employant le mot énergie pour représenter le travail : *énergie affirmative* et *énergie négative*.

D'Alembert (1743) va aussi suspecter la notion de force vive, comme toute idée de force, qui lui semble trop abstraite, préférant parler de *mouvement*.

Un peu plus tard, le débat reprendra, cette fois autour de la notion de *moindre action* : pour Maupertuis (1744) c'est mvs que la nature « économise » et Euler va écrire $\int mvds$ extremum, idée qui fera son chemin, jusqu'à De Broglie...

Par ailleurs Euler, en 1751, applique à la notion de travail le nom d'effort et, dès 1761, écrit que le travail de la force appliquée de composantes P, Q, R est $P dx + Q dy + R dz = dS$, différentielle totale exacte suggérant la notion de *potentiel*.

Lagrange (*La Mécanique Analytique*, 1788) fonde toute sa mécanique sur le principe des travaux ou vitesses virtuelles et va montrer qu'il est basé à la fois sur la notion de force et sur le fait expérimental que le travail des forces de liaison est nul, quand il n'y a pas de frottement.

Il va justifier le principe des travaux virtuels, qu'il appelle *principe des vitesses virtuelles*, au moyen du principe des poulies ; il appelle encore les forces *puissances* et travail *moment* et pose :

$$P dp + Q dq + R dr = d\Pi \text{ travail élémentaire}$$

avec P, Q, R composantes des forces appliquées, si elles sont « *intégrales* » (forces centrales par exemple).

En outre il justifie le *principe des forces vives*, et quand il écrit $\Sigma m\Pi$ intégrale du travail élémentaire de la force généralisée, il n'est pas loin de la notion d'*énergie potentielle* (fig. 2).

34. Dans le cas où la quantité $Pdp + Qdq + Rdr + \dots$ est intégrable, lequel a lieu lorsque les forces P, Q, R , etc., tendent à des centres fixes ou à des corps du même système, et sont fonctions des distances p, q, r , etc., en faisant

$$Pdp + Qdq + Rdr + \dots = d\Pi,$$

l'équation précédente devient

$$S \left(\frac{dx d^2x + dy d^2y + dz d^2z}{dt^2} + d\Pi \right) m = 0,$$

dont l'intégrale est

$$S \left(\frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{2 dt^2} + \Pi \right) m = H,$$

dans laquelle H désigne une constante arbitraire, égale à la valeur du premier membre de l'équation dans un instant donné.

on aura Π exprimé par une fonction finie de p, q, r , etc.; par conséquent, on aura aussi

$$\delta\Pi = P\delta p + Q\delta q + R\delta r + \dots$$

Multipliant par m et prenant la somme pour tous les corps du système, on aura

$$S(P\delta p + Q\delta q + R\delta r + \dots) m = S\delta\Pi m = \delta \cdot S\Pi m,$$

puisque le signe S est indépendant du signe δ .

Il n'y aura ainsi qu'à chercher la valeur de la quantité $S\Pi m$ en fonction de ξ, ψ, ϕ , etc.; ce qui ne demande que la substitution des valeurs de x, y, z , en ξ, ψ, ϕ , etc., dans les expressions de p, q , etc. (art. 4, sect. II, 1^{re} partie); et cette valeur de $S\Pi m$ étant nommée V , on aura immédiatement

$$\delta V = \frac{dV}{d\xi} \delta\xi + \frac{dV}{d\psi} \delta\psi + \frac{dV}{d\phi} \delta\phi + \dots$$

Fig. 2. — Lagrange (1788) écrit une expression qui contient l'énergie potentielle et exprime la conservation de l'énergie totale, mais il ne le dit pas...

Quand il écrit $S \left(\frac{1}{2} mv^2 + \Pi m \right) = \text{constante}$, il aurait pu

énoncer la *conservation de l'énergie totale*; en effet il pose :

$$T = S \frac{m}{2} \left(\frac{dx^2}{dt^2} + \frac{dy^2}{dt^2} + \frac{dz^2}{dt^2} \right)$$

$$V = Sm\Pi \quad T + V = H,$$

la constante s'appelle H , et pourtant Hamilton n'a que trois ans...

Plus tard, Poisson écrira, en 1809, $T - V = R$ (c'est le lagrangien L) et Hamilton posera en 1834 : $T = U + H$, $H = T - U = T + V =$ énergie totale, les coordonnées, dites canoniques, pouvant être indépendantes les unes des autres.

Par ailleurs, Lagrange raccroche le *principe de moindre action* à celui des forces vives ; Euler a écrit : $\delta \int v ds = 0$; Lagrange en déduit : $\delta \int v \times v dt = 0$ ou $\delta \int v^2 dt = 0$, ou $\delta \int 2T dt = 0$ si $T = \frac{1}{2} mv^2$. C'est le *principe de la plus grande ou la plus petite force vive*.

Hamilton écrira le *principe de l'action stationnaire* :

$$\delta \int L dt = \delta \int (T + U) dt = \delta \int (T - V) dt = 0.$$

C'est à Young en 1807 que revient la généralisation de la notion d'énergie à la chaleur, l'optique et la chimie, puis viennent les travaux de Rumford, Mayer et Joule sur l'*équivalence*, tandis que Helmholtz énonce le principe de la conservation de l'énergie mécanique lorsque les forces sont centrales : dans le « *Mémoire sur la conservation de la force* » (1847), il veut réunir chaleur, électricité, magnétisme et lumière par la notion d'énergie, qu'il appelle « *Kraft* », c'est-à-dire force ; pour lui tout se ramène à de l'énergie mécanique, mais il essaie d'expliquer, alors que les tenants de « l'Energétique » se cantonneront dans un positivisme assez étroit ; selon Helmholtz, pour que l'énergie mécanique totale se conserve, il faut que les forces soient centrales, ou que les forces intérieures soient conservatrices et constituent ce qu'il appelle des *tensions* (dérivant d'un potentiel...).

En 1851, W. Thomson, développant les idées de S. Carnot, met fin définitivement à la théorie du calorique, tandis que Clausius, reprenant les « *Réflexions* » de S. Carnot (1824) écrit en 1854 que

$\frac{\delta Q}{T}$ est une différentielle totale exacte (pour une transformation réversible), expression qu'il intègre en 1865 sous le nom d'*entropie*.

En 1859, Rankine établit la différence entre *énergie potentielle* et *énergie cinétique*.

Enfin, les tenants de l'« *Energétique* », comme Oswald et Duhem, continuateurs de Helmholtz, vont en même temps s'opposer aux *atomistes*, le remplacement de la matière par l'énergie

les entraînant à des exagérations que rendent bien caduques les théories de la relativité et des quanta.

Il reste que le problème de la conservation de l'énergie avec l'évolution des *systèmes fermés ou ouverts* a retrouvé récemment un regain d'actualité avec la thermodynamique des *phénomènes irréversibles* et des *structures dissipatives*, qui réussit à réconcilier irréversibilité et dynamique, sortant ainsi de l'impasse dans laquelle se trouvaient les physiciens à la fin du XIX^e siècle.

BIBLIOGRAPHIE

Lectures de Mécanique. E. JOUGUET. Gauthier-Villars. 1908.

Histoire de la Mécanique. R. DUGAS. Dunod. 1950.

Histoire de l'énergie mécanique. F. HALBWACHS. Cuide n° 18. Janvier 1981.
