HISTOIRE DE L'ÉNERGIE MECANIQUE

Francis Halbwachs

Professeur à l'Université de Provence.

Introduction : délimitation du problème

L'énergie mécanique cinétique.

Le présent travail - comme celui portant sur 'l'histoire de la chaleur (Cuide 17) - constitue un chapitre d'un ouvrage non encore achevé couvrant l'histoire générale de l'Energie et recherchant un éclairage mutuel entre cette histoire et la psychologie cognitive.

Introduction : délimitation du problème.

Il n'y aurait pas de grandes difficultés à centrer et délimiter un exposé sur la notion d'énergie dans le cadre d'un enseignement scientifique, c'est-à-dire à préciser ce que recouvre cette notion pour la science d' aujourd'hui. Les manuels traditionnels de Terminale définissent l'énergie en disant "qu'un système possède de l'énergie quand il peut fournir du travail au milieu extérieur". Autrement dit, toutes le. formes de. l'énergie sont reconnues comme telles. par référence à l'une d' entre elles, le travail mécanique. Mais il existe des points de vue plus modernes. Ainsi le grand physicien contemporain Richard P. FEYNMAN a rédigé un cours de physique à l'intention des étudiants de premier cycle (under-graduate students) des universités américaines, où il tente de reconstruire tout l'édifice de la physique, du point de vue des idées modernes, et en même temps sous une forme facile à comprendre.En tête de tout l'ouvrage se trouva un chapitre premier et fondamental qui traite de la "conservation de l'énergie", laquelle apparaît ainsi comme la pierre angulaire de tout l'édifice.

FEYNMAN commence par se demander ce que c'est que l'énergie, et il affirme d'entrée de jeu "qu'il y a un fait, ou si l'on préfère, une loi, gouvernant tous les phénomènes connus jusqu'aujourd'hui. Cette loi ne souffre pas d'exception, elle est exacte, autant que nous puissions le savoir. C'est la loi de la conservation de l'énergie. Elle affirme qu'il y a une certaine quantité, appelée énergie, qui ne change pas, à. travers tous les changements variés que subit la nature. C'est une idée très abstraite, en ceci que c'est un principe mathématique. Ce principe dit qu'il y a une quantité numérique que ne change pas, quand quelque chose se produit. Ce n'est pas là une description d'un mécanisme. de quelque chose de concret ; c'est seulement un fait étrange : nous pouvons calculer un certain nombre, et quand nous avons fini d'observer la nature jusqu'au bout de ses tours de passe-passe. et que nous calculons de nouveau ce nombre, nous trouvons qu'il est le même (c'est un peu comme le fou sur une case noire; après un nombre quelconque de coups, dont le détail n'est pas connu. on retrouve le fou sur une case noire - C'est une loi de genre) - Comme c'est une idée abstraite, nous allons illustrer sa signification par une analogie..

FEYNMAN imagine alors un enfant terrible, Dennis la Terreur, que sa mère enferme toute la journée dans sa chambre, avec pour jouer 28 blocs de construction. tous identiques et impossibles à casser. Chaque soir la mère compte les blocs et elle en retrouve toujours 28 ; c'est une loi expérimentale! Tellement qu'un soir, ne trouvant que 27 blocs, elle fait des recherches plus soigneuses, et découvre le vingt huitième bloc sous la couverture. Un jour cependant, il manque deux blocs qu'on ne retrouve décidément pas dans la chambre. Mais on s'aperçoit que la fenêtre était ouverte. Dennis avait jeté les blocs manquants. qu'on ramasse dehors sur la pelouse. Une autre fois. on compte 30 blocs. Mais on apprend qu'un copain de Dennis est venu jouer avec lui. apportant ses propres constructions, et qu'il a laissé deux de ses blocs. On décide alors de maintenir la fenêtre fermée et d'interdire toute visite, et alors la loi se trouve régulièrement vérifiée. Mais un soir, le nombre des blocs n'est que de 25. En fait Dennis possède une boîte à jouets qui ferme à clé et il s'oppose à ce qu'on l'ouvre. Sa mère alors s'arme d'une ruse, sachant que la boîte vide pèse 16 onces (N.B. ; une once pèse à peu près 30 grammes) et que chaque bloc en pèse 3, elle pose la boite fermée et pose la relation suivante :

(nombre de blocs apparents) + (poids de la boite - 16 onces) / 3 onces = Constante

relation plus générale. qui se trouve toujours vérifiée. Cependant, un autre jour apparaît une nouvelle divergence; Dennis paraît avoir jeté des blocs dans l'eau sale de son bain, et on ne peut pas les voir. Alors sa mère imagine de mesurer le niveau du bain, qui était initialement de 6 pouces (N.B ; un pouce mesure environ 2,5 centimètres) et de tenir compte de ce qu'un bloc fait monter le niveau de 1/4 de pouce. D'où une nouvelle formule :

(nombre de blocs apparents) + (poids de la boîte - 16 onces) / 3 onces
+ (hauteur de l'eau - 6 pouce) / 1/4 de pouce.= Constante

A la fin, la mère a établi une formule relativement compliquée, représentant une quantité, qui une fois calculée, ' fournit un résultat constant.

FEYNMAN précise qu'il y a une différence importante entre cet apologue et la conservation de l'énergie, c'est qua dans la nature, il n'y a pas de blocs ; dans les formules du type précédant, on doit supprimer le premier terme, et il ne nous reste plus à calculer que des choses plus ou moine abstraites. Par contre, nous devons, comme dans l'histoire Dennis, nous assurer soigneusement que rien n' est entré dans. notre système et que rien n'en est sorti. "De même, l'énergie se présente sous. un grand nombre de formes différentes, et pour chacune nous aurons une formule spéciale. Si nous formons le total des formules correspondant à chacune de ces contributions, alors ce total demeurera constant".

"Cependant, il est important de nous rendre compte que, dans la physique d'aujourd'hui nous ne savons pas ce que l'énergie est... C'est seulement une chose abstraite, en ce qu'elle ne nous apprend rien sur le mécanisme, ou sur les. raisons d'être de chacune des formules".

Nous devons maintenant nous rendre compte. que n'importe quelle définition de l'énergie - traditionnelle ou moderne - est tout à fait inutilisable quand nous parlons de l'histoire de l’énergie. Nous avons. à étudier tout un développement historique, une idée qui possède nécessairement une certaine continuité dans son développement mais qui a changé plusieurs fois. au cours de l'histoire, de nom, de forme et peut-être même de contenu. Nous devons, avant de commencer, nous interroger .sur ce que nous allons étudier, sur l'identité de l'idée dont nous allons explorer le développement. L'acception que nous donnerons à l'idée d'énergie va nous déterminer la ligne continue que nous allons suivre dans l’histoire, mais à des. définitions différentes correspondront des lignes différentes.

Une première méthode consisterait à relever dans les textes scientifiques de toutes les époques la présence du mot énergie". Il s'agit d'un mot dérivé du grec, par conséquent introduit par les humanistes à la Renaissance, pour désigner une idée ou un ensemble d'idées déjà assez formé pour exiger un vocable spécial. L'étymologie , εν = dans, εργω = faire, agir (même racine que le mot vulgaire "organe") nous précise déjà le sens , il s'agit d'un principe ou d'une puissance d'action qui réside dans les choses. Cependant, ce serait très imprudent de penser que cette idée sera toujours exprimée par le même mot. D'autres exemples (le mot force, le mot chaleur) nous montrent au cours de l' histoire un constant chassé-croisé entre signifiants et.signifiés! Du reste si nous nous référons au Littré, nous voyons qu'il ne mentionne même pas la signification scientifique précise du mot énergie. Les exemples sont, l'énergie musculaire, l'énergie d'un remède, d'un acide, l'énergie d'un mot, d'une expression ; la force d'âme, et un terme de théologie. Si nous voulons faire une étude cohérente, c'est au sens - au signifié - que nous devons nous attacher. Une autre option serait de considérer l'énergie dans tous les phénomènes physiques où - à notre connaissance à nous modernes - elle est l'œuvre, même quand les savants d'autrefois n'en avaient pas conscience; Mais alors noua aurions à faire toute l' histoire de la physique - et de la chimie. Toutes les fois qu'il s'opère un changement de quelque nature que ce soit, on peut le considérer comme un transfert ou un échange d'énergie, Par exemple, le loi de Coulomb, établie à la fin du XVIIIème siècle, nous donne la force exercée par une charge électrique sur une autre. Mais à strictement parler, une telle force ne se manifeste - et par conséquent ne peut être étudiée que si elle produit un changement, par exemple un déplacement de la charge attirée et repoussée. Et un tel changement peut toujours être décrit comme un échange d'énergie - par exemple une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique. Donc, de ce point de vue, la loi de Coulomb est une loi énergétique, bien que Coulomb l'ait entièrement ignoré. Il est clair que si nous adoptions ce point de vue, et il n'est pas un point de l' histoire de la physique que nous puissions laisser de côté. A l'opposé, nous pourrions nous limiter à l'étude de l'énergie en tant que concept général, et perçu comme général, comme la "substance" commune à toutes les formes physiques particulières sous lesquelles elle apparaît. Alors l'étude de ce que nous savons aujourd'hui qui représente l'énergie mécanique, l' énergie calorifique, l'énergie chimique, etc... ne ferait pas partie proprement de l'étude de l'énergie, tant que ne serait pas reconnue la nature énergétique commune de toutes ces grandeurs. Alors l'histoire de l'énergie commencerait très tard, au milieu du XIXème et lors de l'apparition de la conception générale connue sous le nom d'Energétique. Et du reste elle ne se poursuivrait pas très longtemps, car, une fois compris qu'il n'y a qu'une énergie, qui se conserve à travers ses changements de forme, il n'y a plus grand chose à dire ou à trouver sur ce sujet - et effectivement on n'a progressé . à partir de ce moment que dans l'étude des formes physiques particulières de l'énergie et des particularités de leurs transformations et tout ceci ne concerne plus le concept général d'énergie. Cette troisième option nous parait cette fois trop restrictive et nous ne nous y arrêterons pas.

Reste une dernière solution à laquelle nous nous arrêterons, dégager les caractéristiques communes aux différentes formes de l'énergie (telles que nous les identifions aujourd'hui), en nous attachant à l'aspect qu'elles prennent dans l'idée que nous nous en faisons, à leur aspect "psychologique", " ou plus précisément opératoire, et nous en former un concept général, un concept abstrait, qui se rencontre sous diverses formes concrètes. Chacune de ces formes concrètes a une histoire particulière dans le domaine correspondant de la physique. Elle est apparue. À un moment donné de la pensée scientifique et a été étudié comme telle, bien avant qu'on ait aperçu entre ces diverses formes, d'abord des analogies, puis des transformations mutuelles, enfin une identité da contenu qui a fondé le concept abstrait et général de l'énergie, et qui fournit alors un terme, un point d'aboutissement, où nous retrouvons le point de vue de la troisième option que nous venons d'écarter.

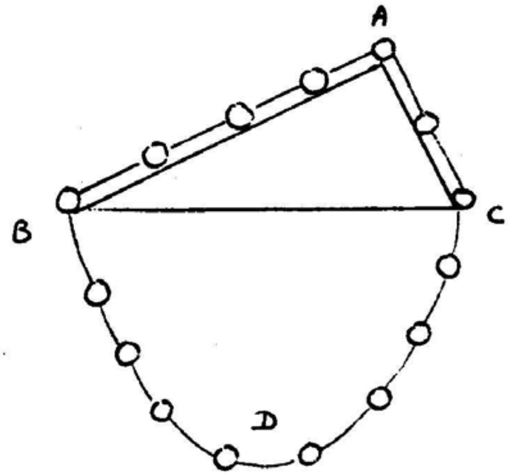
Nous n'aurons pas de peine à formuler ces caractéristiques communes à partir du point de vus développé plus haut par FEYNMAN, point de vue qui remonte du reste à Henri POINCARÉ , "il ne nous reste plus qu'un énoncé pour la principe de l'énergie : Il y a quelque chose qui demeure constant" (*La Science et l'Hypothèse*). Plus concrètement, si on peut considérer un système physique comme isolé, et si des changements sa produisent dans ce système, il y a à travers ces changements une quantité qui demeure constante, qui est échangée et redistribuée entre les différentes parties du système, sans augmenter ni diminuer d'un état à l'autre. Si nous considérons, (comme le font POINCARÉ et FEYNMAN} tous les systèmes possibles et toutes les sortes possibles de changements, alors nous avons le principe général - et le concept général - de l'énergie, qui, comme nous l'avons dit, n'a été mis en évidence que récemment. Mais si nous nous restreignons à tel ou tel type particulier de systèmes et à telle classe de changements d'état, alors nous trouverons dans chaque domaine de la physique une forme particulière de l'énergie, qui en général a été reconnue très tôt comme "quelque chose qui se conserve à travers les changements" et nous tiendrons une 'forme de l'énergie. L'importance de ce point de vue tient au fait que nous rencontrons dans chaque cas un même schème psychologique, le schème de la conservation, saisi par la même intuition et mettant en jeu les mêmes caractéristiques opératoires, c'est-à-dire conduisant à des procédés analogues, à une attitude mentale analogue, même pendant la longue période où cette analogie n'a pas été consciente.

Cette formule ne doit pas être prise comme une définition de l'énergie prise en ses différentes formes et à ses différentes étapes de conceptualisation. Comme définition elle serait insuffisante, car il y a bien d'autres quantités qui sont constantes dans un système isolé, la masse, la charge électrique, la quantité de mouvement, le moment cinétique, pour ne pas parler des notions plus sophistiquées de la physique moderne (nombre baryonique, hypercharge, charme, etc...). Ce qui distingue à cet égard les diverses formes de l'énergie. c'est précisément qu'elles peuvent se transformer les unes dans les autres - ce qu'on a reconnu plus tard. Il s'agit seulement de trouver à partir de ce que nous savons aujourd'hui de l'énergie) à partir de quel moment a surgi, dans chaque domaine particulier de le physique, la reconnaissance de la conservation de quelque chose qui était en fait une_ forme de l'énergie et que nous connaissons comme telle aujourd'hui.

L'énergie mécanique statique

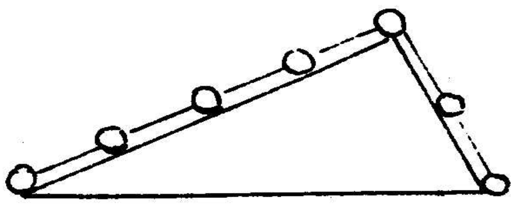
Nous savons que la forme la plus simple et la plus élémentaire de l'énergie mécanique se rencontre dans l'étude statique des systèmes soumis à des forces. Au repos, de tels systèmes contiennent dans chacun de leurs états une énergie déterminée qui se traduit par la production ou l'absorption d'un certain travail pour passer d'un état d'équilibre à un autre, et 1a conservation de cette énergie se traduit dans le principe de "l'égalité du travail moteur et du travail résistant". La première étape de notre enquête va être de chercher si et comment les lois de la statique ont été reliées à un tel principe de conservation.

La Statique est une science très ancienne et nous trouvons déjà dans l'antiquité des études très pénétrantes et des démonstrations rigoureuses, notamment chez Archimède et chez Héron d'Alexandrie. Mais nulle part nous ne rencontrons rien qui puisse correspondre à notre notion de travail, et encore moins à l'énergie. Nous n'en dirons rien, et nous passerons directement à la Renaissance. Ce n'est qu'au début du XVII ème siècle que nous trouvons chez Stevinius (1606) une démonstration - célèbre



parmi les historiens et philosophes des sciences - qui, sans utiliser ni le travail ni l'énergie, fait appel à un principe que nous rencontrerons souvent dans la suite: le principe de l’impossibilité du mouvement perpétuel.

Il s'agit de la loi du plan incliné. Stevinius imagine une chaîne homogène, parfaitement polie et parfaitement graissée - en fait il considère un système de billes égales et équidistantes, articulées les unes aux autres - cette chaîne repose sur les deux plans inclinés AB et AC et se referme par la "chaînette" BDC, dont il est "évident" qu'elle a une forme symétrique. Un tel système,abstraction faite des frottements,est nécessairement en équilibre, car si les forces agissant sur AC l'emportaient par exemple Sur celles agissant sur AB, la chaîne se mettrait en mouvement dans le sens BAC ; et comme elle conserverait ainsi la même forme, les causes de ce mouvement se renouvelleraient sans cesse, et « ainsi ce mouvement n'aurait aucune fin ce qui est absurde », affirme Stevinius comme une évidence. Cet équilibre étant admis, rien ne sera changé si on coup e la partie BDC, qui est symétrique et ne tire donc pas plus d'un côté que de l'autre. Ainsi, les deux tronçons AB et AC qui restent se font exactement équilibre, ou comme dit Stevinius, leurs "poids apparents" - c'est-à-dire, dans notre langage, les forces qu'ils exercent en A - sont égaux, ces poids apparents étant ainsi proportionnels aux longueurs des plans AB et AC, ou, comme nous dirions aujourd'hui, étant inversement proportionnels aux pentes des deux plans. L'essentiel ici n'est pas l'énoncé de la loi du plan incliné, qui n'est pas nouvelle - on la trouve déjà au XIIIème siècle dans un traité de Jordanus Nemorarius – ni l'usage du raisonnement par l'absurde, familier aux géomètres depuis l'Antiquité,



mais le fait qu'ici "l'absurde" est un absurde physique, l'impossibilité du mouvement perpétuel, qui sous-entend, encore très obscurément l'idée que rien ne naît de rien dans le domaine moteur, c'est-à-dire l'idée d'une conservation.

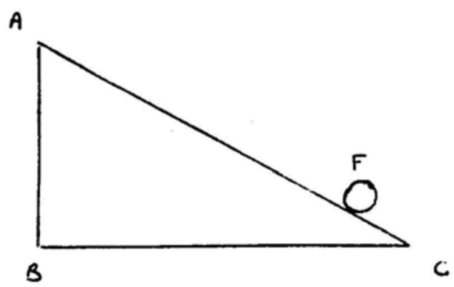
C'est ici d'ailleurs une lueur liée à un exemple particulier, mais dans l'ensemble de la statique, Stevinius n'est pas guidé par une intuition de ce genre, et les principes qu'il pose se traduisent par des relations de proportionnalité sans qu'apparaisse nulle part l'expression explicite du travail. Ainsi, à propos de l'équilibre d'un système de poulies, la règle s'énonce: "De même que l'espace [parcouru par] l'agent est à l'espace [parcouru par] la patient, de même est la puissance du patient à la puissance de l'agent". Autrement dit: las déplacements sont inversement proportionnels aux forces. Cette relation est mathématiquement équivalente à l'égalité du travail moteur et du travail résistant, mais Stevinius ne croit pas devoir exprimer explicitement les produits égaux. Le concept - l'intuition - du travail, comme une entité globale concrète n'est pas encore formée- La meilleure preuve en est que la loi énoncée par Stevinius est relative à un dispositif particulier et n'est nullement posée comme un principe général, ce qui montre que le travail n'est pas conçu - même implicitement - comme un concept déterminé, qui conduirait à énoncer comme loi générale le principe d'égalité du travail moteur et du travail résistant. Nous contestons donc fortement l'opinion de Monsieur René Dugas (Histoire de la Mécanique) auquel nous empruntons cette citation - et bien d'autres dans la suite - quand il dit que "Stevinius énonce d'une manière parfaitement explicite le principe des travaux virtuels". Il n'y a pas trace de travail ici.

C'est cependant vers cette époque que ce concept apparaît pour la première fois, dans un traité de Salomon de Caus, intitulé: "les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines, tant utiles que plaisantes, auxquelles sont adjoints plusieurs desseings de grotes et fonteines". Il y introduit le produit du poids par la hauteur dont il se déplace, avec, cela est à remarquer, le mot même de "travail". Ce dernier point est cependant une remarque anecdotique, car le ,produit p.h sera désigné dans la suite par des vocables très variés, notamment par "force" chez Descartes, et même à une date aussi avancée que 1824, Sadi Carnot parle de la "puissance motrice" comme "ayant, comme on sait, pour mesure le produit du poids multiplié par la hauteur dont il est censé élevé" (Reflexions sur la puissance motrice du feu).

Mais le concept même de travail est très clairement formé et utilisé dans ses propriétés opératoires dans les travaux de statique de Descartes.

Citons entre autres une lettre à Constantin Huygens (1637) : "L"invention de toutes les machines simples n'est fondée que sur un seul principe, qui est que la même force qui peut lever un poids par exemple de 100 livres à la hauteur de 2 pieds, en peut aussi lever un de 200 livres à la hauteur d'un pied, ou un de 400 livres à la hauteur d'un demi pied, et ainsi des autres, si tant est qu'elle lui soit appliquée". On a encore la même loi mathématique que chez Stevinius, mais cette fois elle est exprimée par une équivalence des produits p.h, produits qui reçoivent le nom de "force". La nécessité d'introduire un mot spécial montre la formation d'un concept global, qui permet. une immédiate généralisation ; ce n'est pas la comparaison d'un travail moteur et d'un travail résistant produits par une machine déterminée, mais l'affirmation d'une loi d'équivalence générale et applicable d'emblée à toutes les machines, et par là détachée de la notion même de machine.

Descartes donne aussitôt la justification,philosophique : "Et ce principe ne peut manquer d'être reçu, si on considère que l'effet doit toujours être proportionné à l'action qui est nécessaire pour le produire, de façon que, s'il est nécessaire d'employer l'action par laquelle on peut lever un poids de 100 livres à la hauteur de 2 pieds, pour en lever un à la hauteur d'un pied, celui-ci doit peser 200 livres. Car c'est le même de lever 100 livres à la hauteur d'un pied, et derechef 100 livres encore à la hauteur d'un pied, que d'en lever 100 à la hauteur de 2 pieds". Suit la théorie particulière de chacune des machines simples: "la poulie, le plan incliné, le coin, le tour ou la roue (treuil), la vis, le levier et quelques autres", théorie qui repose dans chaque cas sur le principe de l'égalité du travail moteur et du travail résistant.



Notons à propos du plan incliné, cette remarque, qui montre le "sens physique" aigu de Descartes, son sens de l'expérimental et de la disjonction des facteurs principaux et des facteurs accessoires : "Mais il y a encore à rabattre de ce calcul la difficulté qu'il y aurait à mouvoir le corps F le long du plan AC si ce plan était couché sur la ligne BC, dont je suppose toutes les parties également distantes du centre de la terre

. Il est vrai que, cet empêchement étant d'autant moindre que le plan est plus dur, plus égal et plus poli, il le peut derechef être exprimé qu'à peu près et n'est pas fort considérable. On n'a pas besoin non plus de considérer que, la ligne BC étant une partie du cercle qui a même centre que la Terre, le plan AC doit être tant soit peu voûté ... car cela n'est nullement sensible". Autrement dit, le principe de l’égalité des travaux dans la situation d'équilibre n'est valable en toute rigueur que si on peut négliger les frottements.

Notons encore que l'emploi du mot "force" pour désigner le travail, alors que ce mot force a simultanément d'autres significations parmi les savants de l'époque, est la source de malentendus dont Descartes a conscience et qu'il tente de dissiper, notamment dans une lettre à Mersenne (1638) : "vous avez enfin entendu le mot "force" au sens que je le prends, quand je dis qu'il faut autant de force pour lever un poids de 100 livres à la hauteur d'un pied qu'un de 50 livres à la hauteur de 2 pieds, c'est-à-dire qu'il y faut autant d'action ou autant d'effort ... La "force" dont j'ai parlé a toujours deux dimensions, et non la force [terme à prendre dans son sens moderne] qui sert en chaque point à soutenir [un poidS] , laquelle n'a jamais qu'une dimension".

Ainsi la notion de travail et le principe de l'égalité du travail moteur et du travail résistant sont bien constitués et correctement employés par Descartes. Mais avons-nous ici une intuition, même implicite, de la notion d'énergie? (qui serait ici l'énergie potentielle). Pour cela il faudrait franchir encore une étape : exprimer les travaux moteurs par un nombre positif, les travaux résistants par un nombre négatif, et considérer la somme (algébrique) de ces travaux comme une variation d'une quantité globale. L'égalité (en valeur absolue) du travail positif et du travail négatif exprimerait alors le fait que cette variation est toujours nulle (dans les situations considérées) et que par conséquent la quantité formée est constante. Ce serait alors proprement la construction d'une énergie. Or cette étape n'est pas franchie, pas même approchée par Descartes - ni par ses contemporains. Le statut psychologique qu'a le travail à cette époque ne fait aucune distinction entre les poids qui montent et les poids qui descendent. Le travail est toujours considéré comme positif. Disons tout de suite que le passage de la notion de travail à celle d'énergie potentielle ne s'est pas fait historiquement dans le cadre de la statique, ni même dans celui plus large de la mécanique. C'est seulement au milieu du XIX ème siècle, lorsqu'on s'est préoccupé d'énoncer la conservation de l'énergie sous une forme tout à fait générale que s'est imposé la besoin d'introduire une forme particulière d'énergie liée uniquement à l'action des forces mécaniques.

L'énergie mécanique cinétique

L'idée d'une énergie liée à l'état de mouvement des corps, et surtout de sa permanence, liée à la permanence du mouvement, apparaît très tôt dans la pensée mécanique, en corrélation avec le principe de l'inertie. Comme on le sait l'inertie, c'est-à-dire la tendance qu'ont les corps à poursuivre leur mouvement avec la même vitesse - et en ligne droite - tant qu'aucune action extérieure n'est exercée sur eux, s'est imposée peu à peu à la fin du Moyen Age, en réaction contre la doctrine d'Aristote. Pour celle-ci - et en mettant à part les mouvements "naturels", comme la chute des corps, qui ramènent spontanément les corps en leur "lieu"- les corps ont naturellement tendance au repos, et ne peuvent être maintenus en mouvement que par l'action permanente d'une force "violente". Si celle-ci cesse, le mouvement s'arrête aussitôt. Cette doctrine semble découler de l'expérience courante, et les exceptions apparentes (problèmes du "jet" des projectiles) sont expliquées par Aristote par un artifice faisant intervenir l'action de l'air pour prolonger le mouvement après que la force a cessé de s'exercer.

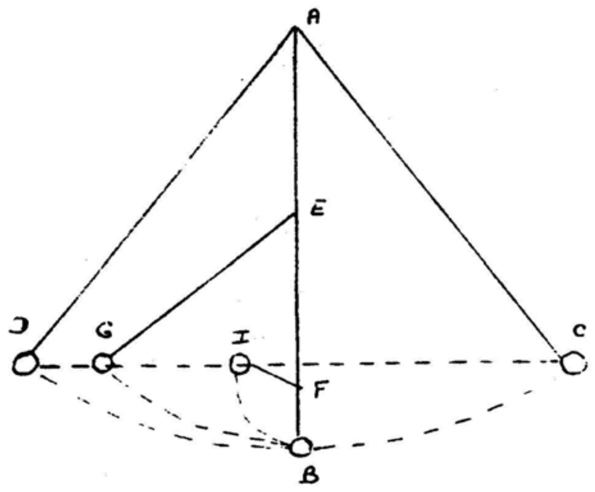
Du XIVème au XVIème siècle, se développent des critiques de plus en plus nombreuses de cette doctrine (Buridan, Oresme, Vinci, Soto, Benedetti). Le rôle de l'air dans la perpétuation du mouvement violent des projectiles paraît de plus en plus invraisemblable, étant par ailleurs en contradiction avec son rôle de freinage (reconnu par Aristote). Buridan (au milieu du XIVe siècle) donne l'exemple de la permanence du mouvement de rotation de la toupie, ou de la meule de forgeron, permanence évidemment étrangère à l'action de l'air (la meule peut en outre être protégée de l'air ambiant par une bâche). Buridan met alors en avant une idée et une notion nouvelle, celle de l' »impetus » qui est une première intuition de l'inertie. L'impetus est une «puissance mouvante» qui est « imprimée » au mobile par le « moteur » pendant la phase de lancement, et qui, inséparable du mouvement, est capable d'entretenir ce même mouvement. L'impetus imprimé à un corps est d'autant plus grand que la vitesse est plus grande. Il est d'autre part d'autant plus grand que le corps contient plus de matière. Il a tendance à se conserver puisque, comme le dira Léonard de Vinci "toute impression désire permanence". Ainsi l'inertie n'est pas comprise d'abord comme une propriété pure et simple des corps, mais comme le résultat d'un processus « automoteur » : l'impetus produit à chaque instant le mouvement du corps, et la permanence de l'impetus entraîne la permanence du mouvement.

La notion d'impetus permet d'éclairer quelque peu certains problèmes concrets. Ainsi le mouvement courbe des projectiles: au cours du mouvement du projectile, la résistance de l'air intervient pour épuiser peu à peu l'impetus, car, (Benedetti) "tout agent pâtit en agissant". C'est pourquoi, 'lorsque l'air est entraîné par le corps, le corps lui-même est retenu par l'air et le projectile finit par perdre tout son impetus et prendre un mouvement vertical de chute "naturelle".

D'autre part, les successeurs de Buridan apercevront que l'impetus peut être cumulatif. Ainsi (Benedetti) "la fronde peut imprimer au corps un impetus plus grand {que la main] car par suite des révolutions nombreuses, le corps reçoit un impetus toujours plus grand". Cette remarque permet finalement de faire disparaître la distinction malencontreuse entre mouvements naturels et mouvements violents: le corps en chute libre n'est pas moins soumis à une force motrice que la pierre lorsque la main la lance. Simplement, dans le premier cas, la force agit en permanence; il en résulte que "lorsque le corps se meut d'un mouvement naturel, sa vitesse augmentera sans cesse ; en effet, l'impetus et l'impression qui existent en lui croissent sans cesse, car il est constamment uni à la vertu mouvante". Ainsi, l'application de la doctrine de l'impetus au mouvement naturel fait passer de l'image (anthropomorphique) d'un corps brusquement lancé à qui nous avons fourni une fois pour toutes un certain impetus, à la conception (physique) d'une force agissant en permanence et ajoutant sans cesse de nouvelles portions d'impetus, c'est-à-dire au mouvement accéléré.

Il est clair que la notion d'une puissance active interne (εν – εργια) imprimée soit par notre force, soit par la nature, aux corps, et qui se conserve en eux dans son activité et les maintenant en mouvement, est très proche de l'intuition d'énergie telle que nous avons tenté de la cerner en commençant. Seulement, comme on le sait aujourd'hui, il y a deux quantités distinctes qui sont en jeu, et qui manifestent l'inertie de la matière : la quantité de mouvement, qui implique une direction - constante - du mouvement, et l'énergie proprement dite ou énergie cinétique. La confusion entre ces deux aspects de l'inertie, a pesé longtemps sur le développement de la mécanique, et suscité des controverses sans fin dès qu'on a voulu préciser quantitativement la grandeur considérée.

Notons d'abord l'apport de Galilée. Dans le Discours sur deux Sciences Nouvelles (1638), on voit s'effectuer, sous forme encore très qualitative, le passage de l'impetus ("impeto" ou "momento") à l'énergie de mouvement : Galilée commence par admettre comme un postulat fondamental que « les degrés de vitesse acquis par le même mobile sur des plans diversement inclinés inclinés sont égaux lorsque les hauteurs le sont ». Ce principe, rapporté explicitement à des plans "parfaitement durs et polis", est immédiatement appuyé par des expériences. Galilée considère un pendule lâché en C d'une certaine hauteur. De l'autre côté, le pendule va remonter en D à le même hauteur. A peu près, car "il s'en faudra toutefois d'un petit intervalle qu'il n'y arrive, circonstance due précisément à la résistance de l'air et du fil. De là nous pouvons conclure en toute vérité que l'impeto acquis par la balle au point B dans sa descente de l'arc CB est tel qu'il suffit à la faire remonter d'un arc identique BD à la même altitude".



On aura reconnu dans la dernière phrase l'équivalence entre la forme cinétique de l'énergie (l'impeto se réfère explicitement à la vitesse du pendule en B) et le travail du poids qui apparaît comme produisant puis consommant l'impetus au cours de la descente et de la remontée. L'énoncé de la transformation de l'énergie est particulièrement net.

Une généralisa-tion est proposée, consistant à placer sur la verticale AB un clou (en E, puis en F) qui obligera le pendule à décrire à la remontée des arcs différents. "Vous verrez avec plaisir la balle atteindre l'horizontale au point G" ou au point I.Cette expérience ne permet pas de douter de la vérité du principe supposé ... D'une manière générale, le momento acquis suivant un arc quelconque est égal à celui qui peut faire rebondir le même mobile le long du même arc en remontant. Mais tous les momenti qui font rebondir le mobile le long de tous les arcs BD, BG, BI sont égaux puisqu'ils sont faits de momento acquis dans la descente CB comme le montre l'expérience. Donc tous les momenti acquis en descendant suivant les arcs DB, GB, IB sont égaux".

Enfin, ceci s'applique à des plans diversement inclinés. "Nous ne pouvons pas montrer avec la même évidence que la même chose arrivera quand une balle parfaite descendra le long des plans inclinés tracés suivant la corde de ces mêmes arcs ; au contraire, il est vraisemblable que ces plans, formant un angle du point B, la balle, descendue le long de la corde CE, rencontrant un obstacle en arrivant sur les plans qui remontent suivant les cordes BD, BG, BI perdra dans le rebondissement une partie de son impeto et ne pourra pas remonter à la hauteur de la ligne CD. Mais, l'obstacle enlevé qui nuit à l'expérience, il me paraît bien que l'esprit continue à concevoir que l'impeto (lequel en effet renferme la force de toute la chute) serait capable de remonter le mobile à la même hauteur".

L'expérience (avec ses approximations inévitables) a servi à "faire voir" le principe. Mais Galilée dépasse l'expérience et pose ce que "l'esprit continue à concevoir" et qui est lié à l'intuition que l'impeto renferme « la force de toute la chute ». Nous avons -là l'idée fondamenta1e que l'impeto est une « force » accumulée par la chute et qui conserve toute sa potentialité.

Ce même problème sera repris une vingtaine d'années plus tard par Huygens dans ses études sur la chute des corps. Se proposant de démontrer la proposition que Galilée posait comme postulat et corroborait par des expériences en partie imaginaires, Huygens serre de plus près la signification énergétique du principe. Huygens pose en principe que, dans la descente le long du plan CB, la bille « acquerra précisément une vitesse qui lui permettrait de remonter tout le long de BC », par rebondissement, jusqu'au point d'où elle est partie. Ceci par raison de symétrie, et s'il n'y a pas de frottement. Partant de cette remarque Huygens suppose que le corps en tombant le long de CB acquerrait une vitesse plus faible qu'en tombant de AB. Il serait alors possible de trouver un point F tel que la chute FB donne au corps la même vitesse que la chute CB. Alors on pourra faire descendre le corps suivant FE et il aura la force de remonter suivant BC, c'est-à-dire de s'élever spontanément plus haut qu'il n'est parti, ce qui est absurde. (Notons que Huygens se libère de la difficulté signalée par Galilée au sujet du choc subi par la bille à la jonction des deux plans, choc qui la ralentira : Huygens propose d'interrompre les plans inclinés sur une petite région autour de B, et de faire rebondir la bille sur un plan PQ formant des angles égaux avec les deux plans AB et CB). On démontre de la même façon qu'il est tout aussi absurde de supposer que la bille puisse acquérir le long de CB une vitesse plus grande que le long de AB. Ainsi la seule solution est que les deux chutes AB et CB procuraient la même vitesse. L'important dans cette démonstration c'est - comme dans le cas de la chaîne de Stevinius - le recours à un « absurde physique » - finalement le même que chez Stevinius - l'impossibilité pour un corps de s'élever spontanément sans apport extérieur,. ce qui reviendrait évidemment au « mouvement perpétuel ». C'est donc bien un présupposé énergétique qui est sous-jacent à la démonstration de Huygens comme au postulat de Galilée : il y a équivalence énergétique entre la vitesse et la hauteur, et c'est cette équivalence qui fait que, quand le corps descend spontanément, sa hauteur diminue, et sa vitesse s'accroît suivant une relation bien déterminée, faute de quoi on pourrait utiliser le système à entretenir un mouvement perpétuel. C'est une forme particulière d'évidence.

Ces évidences vont se traduire dans une loi quantitative précise avant le fin du XVIIIe siècle. Mais avant de le montrer, parlons d'un autre problème qui a été abordé entre-temps, celui des chocs et de l'apparition de la conservation de l'énergie cinétique de deux corps qui se heurtent. Ce problème est abordé pour la première fois par Descartes, dans un chapitre des Principes de la Philosophie (1644), où se trouve en même temps le premier énoncé du principe de l'inertie.

On sait que les découvertes scientifiques de Descartes se trouvent enchâssées dans un grand système métaphysique - et mieux, théologique - construit (peut être reconstruit) selon une « méthode » rationnelle très rigoureuse. Le thème dont il s'agit ici en est un exemple frappant.

Descartes aborde d'abord le problème de la "cause" du mouvement, et "parce qu'elle peut être prise en deux façons, nous commencerons par la première et plus universelle, qui produit généralement tous les mouvements qui sont au monde ; nous considérerons par après l'autre qui fait que chaque partie de la matière en acquiert qu'elle n'avait pas auparavant. Pour ce qui est de la première, il me semble qu'il est évident qu'il n'y en a point d'autre que Dieu, qui, par sa toute-puissance a créé la matière, avec le mouvement et le repos de ses parties et qui conserve maintenant en l'Univers, par son parcours ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il y en a mis en le créant. Car, bien que le mouvement ne soit qu'une façon en la matière qui est mue, elle en a pourtant une certaine quantité qui n'augmente et ne diminue jamais, encore qu'il y en ait tantôt plus et tantôt moins en quelquesunes de ses parties ; c'est pourquoi, lorsqu'une partie de la matière se meut deux fois plus vite qu'une autre, et que cette autre est deux fois plus grande que la première, nous devons penser qu'il y a tout autant de mouvement dans la plus petite que dans la plus grande, et que toutes fois et quantes que le mouvement d'une partie diminue, celui de quelque autre partie augmente à proportion. Nous connaissons aussi que c'est une prefection en Dieu, non seulement de ce qu'il est immuable en sa nature, mais encore de ce qu'il agit d'une façon qu'il ne change jamais : tellement qu'outre les changements que nous voyons dans le monde ... et que nous savons arriver ... sans aucun changement de la part du Créateur, nous ne devons point en supposer d'autre en ses oeuvres, de peur de lui attribuer de l'inconstance ; d'où il suit que, puisqu'il a mu en plusieurs façons différentes les parties de la matière lorsqu'il les a créées, et qu'il les maintient toutes en la même façon et avec les mêmes lois qu'il leur a fait observer en leur création, il conserve incessamment en cette matière une égale quantité de mouvement".

Nous voyons apparaître ici - et c'est nous semble-t-il pour la première fois dans l'histoire - une loi universelle de conservation, telle que nous apparaîtra dans la suite la conservation de l'énergie. Cette loi est d'emblée énoncée comme s'appliquant à l'Univers dans son ensemble, et elle s'appuie - Descartes prétend même qu'elle est déduite - de la constance de Dieu, qui est une de ses "perfections". En fait - comme le soulignera Leibniz - l'exigence d'une loi de conservation, tirée de la constance de Dieu (laquelle n'est pensons-nous, que le substitut d'une tendance de notre raison analytique à rechercher et à "chérir" les choses qui dans l'universelle fluence, demeurent fixes et, par leur invariance, nous procurent des instruments opératoires pour comprendre rationnellement le changement), cette exigence prise toute seule ne nous fournit encore aucune indication pour préciser quelles quantités restent constantes. Et au point où se trouve Descartes, c'est l'affaire de sentiment et d'intuition physique, de décider, comme il le fait, que la "quantité de mouvement" qui se conserve c'est précisément .le produit de la masse par la grandeur de la vitesse. Cette loi cartésienne de la conservation de la quantité de mouvement pose un problème intéressant, précisément parce qu'elle est fausse. On a souvent écrit que l'erreur provenait de ce que Descartes considère, non le vecteur $m\vec{v}$, mais le scalaire $m|\vec{v}|$, et que, faute de posséder le bon outil mathématique, il a donné une forme erronée de ce qui devait devenir plus tard (à partir de Newton) et sous le même nom, la notion vectorielle de quantité de mouvement. Ce point de vue est très discutable, car il nous semble clair que l'intuition maniée par Descartes est celle d'une quantité scalaire positive et additive attachée au mouvement, et qui par conséquent a psychologiquement le même statut que l'énergie cinétique. Simplement Descartes prend pour mesure de cette quantité mv et non mv^2. C'est d'ailleurs bien sur ce point exclusivement – et non sur le caractère vectoriel - que porte la critique de Leibniz. Cette intuition d'une quantité en relation directe avec la masse et la "vélocité" (ou grandeur de la vitesse) qui caractérise la puissance virtuelle d'un corps en mouvement, susceptible d'être transmise à un autre corps sans gain ni perte, nous la trouvons chez les enfants, au stade opératoire concret, sous le nom de l'élan, et, comme chez Descartes, l'idée première est qu'elle est proportionnelle à la vélocité (parce que c'est la fonction la plus simple).

Ceci nous semble très probable, parce que la quantité vectorielle qui correspond à la "quantité de mouvement" de Newton, nous la trouvons aussi chez Descartes, sous une forme très vaque, sous le nom de "détermination" : "si on prend garde à la différence qui est entre le mouvement d'une chose et sa détermination à se mouvoir vers un côté plutôt que vers un autre". Le caractère vectoriel de cette notion apparaît clairement dans un passage de la Dioptrique, où les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière sont tirées de l'analogie avec un processus de choc. La détermination y est décomposée et recomposée à partir de ses "composantes" (comme nous dirions) suivant la règle (implicite) du parallélogramme. Rien ne montre que Descartes ait inclus un facteur de masse dans ce nouveau concept, et il n'énonce pas, comme pour sa "quantité de mouvement", une loi générale de conservation (c'est Leibniz qui achèvera de préciser ce concept sous le nom de "quantité de progrès" et qui le présentera comme une constante distincte). Mais son intervention plus ou moins implicite dans le système de Descartes nous renforce dans notre idée que "l'intuition physique" de la quantité de mouvement (scalaire) chez Descartes est une première approche de l'énergie cinétique, non de la "quantité de mouvement" (vectorielle) de

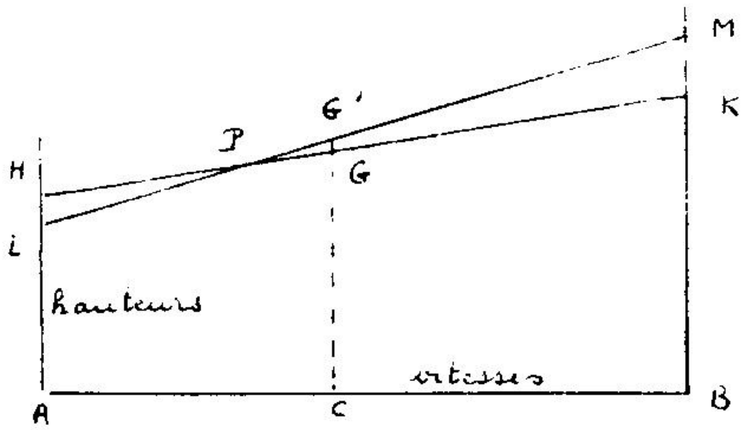
Newton. Nous sommes donc bien dans le cadre du thème de l'énergie comme quantité constante.

La conservation globale de la quantité de mouvement qui est dans le monde ne devient opératoire dans le système de Descartes que par son application à deux cas particuliers. D'une part, dans ce que Descartes appelle la "première loi de la nature : que chaque chose demeure en l'état qu'elle est pendant que rien ne la change. Ainsi nous voyons tous les jours que ... quelque partie de la nature, si elle est en repos, elle ne commence pas de se mouvoir de soi-même, mais que lorsqu'elle a commencé une fois de se mouvoir, nous n'avons aussi aucune raison de penser qu'elle doive jamais cesser de se mouvoir de même force pendant qu'elle ne rencontre rien qui retarde ou qui arrête son mouvement ; de façon que si un corps a commencé une fois de se mouvoir, nous devons conclure qu'il continue par après de se mouvoir, et que jamais il ne s'arrête de soi-même". Prenons garde à la différence de statut entre la première proposition (nous voyons tous les jours) qui repose sur l'expérience courante, et la seconde (nous n'avons aucune raison de penser ... nous devons conclure) qui est contraire à l'expérience, mais que Descartes rapporte explicitement au fait "que Dieu n'est point sujet au changement et qu'il agit toujours de même sorte", c'est-à-dire, à une certitude rationnelle et théologique. Dans les lignes qui suivent, Descartes explique du reste fort clairement, et avec un remarquable sens du concret, pourquoi en fait les corps que nous voyons s'arrêtent à cause des frottements, et "par des raisons qui sont cachées à nos sens", et que, par un préjugé acquis "dès le commencement de notre vie, nous avons jugé qu'ils s'arrêtent d'eux-mêmes et tendent naturellement au repos, mais que c'est une erreur qui répugne manifestement aux lois de la nature". Ainsi, comme nous l'avons vu dès le XIVe siècle, il ° y a un lien logique et psychologique entre les intuitions de conservation de l'énergie et la notion de l'inertie de la matière.

Dans la suite du chapitre, Descartes pose les lois fondamentales des chocs de deux corps, en distinguant plusieurs cas et en imposant dans chaque cas la conservation de la quantité de mouvement totale des deux corps au cours du choc. Malgré les prétentions de Descartes à la déduction rigoureuse, cette loi particulière ne découle pas de la loi générale (relative à l'ensemble de la matière qui est dans le monde) et il est difficile de la déduire - dans le cas de deux boules de billard - de l'immutabilité des actions de Dieu. Cependant, c'est uniquement sous cette forme particulière que la loi de conservation est opératoire, car elle permet à Descartes de traiter complètement du problème des chocs de deux corps et me démontrer les sept "règles" des chocs qui sont toutes fausses, excepté la première. Une étude précise de la déduction montre que la fausseté des règles ne provient pas de la mauvaise expression de la quantité de mouvement, mais du fait que la loi de conservation de l'énergie, même si elle était correcte, ne suffirait pas à résoudre univoquement le problème. Ce qui fait que Descartes introduit pour déterminer la solution, un autre principe (troisième loi de la nature) principe étrangement aristotélicien, et qui contient dès l'origine toutes les erreurs que l'on retrouve dans les "règles". Dans ce problème Descartes est guidé, pour une part, par l'intuition de la conservation de l'énergie, intuition qui est qualitativement juste, mais son deuxième principe heurte le sens commun et "répugne aux lois de la nature" et ainsi prépare l'écroulement de tout le système. En fait, Descartes remarquera que certaines de ses conclusions sont immédiatement démenties par l'expérience, mais il rétorquera fièrement "Et les démonstrations de tout ceci sont si certaines qu'encore que l'expérience nous semblerait faire voir le contraire, nous serions néanmoins obligés d'ajouter plus de foi à notre raison qu'à nos sens".

Le problème des chocs sera repris au cours du XVIIe siècle, et, malgré l'immense prestige du système cartésien, sur d'autres bases que celles des Principes de Descartes. C'est Huygens qui eut le grand mérite d'en donner une solution complète, dans le cas des chocs élastiques, en 1668. Nous ne donnons pas en détail le raisonnement de Huygens, nous contentant des intuitions énergétiques. I1 part d'un cas particulier, celui de deux boules égales lancées l'une vers l'autre avec des vitesses égales, et qui rebondissent symétriquement avec les mêmes vitesses. Puis il considère le cas de deux boules de masses inégales se dirigeant l'une vers l'autre avec des vitesses inversement proportionnelles à leurs masses. C'est le principe des "vitesses propres" étudié antérieurement par Wren et qui semble lié chez lui à une vague analogie avec le levier : si les boules sont censées rouler sur une tige horizontale articulée au point du choc, leurs poids se font équilibre constamment au cours du mouvement et il parait évident que cet équilibre va subsister après le choc. D'où la proposition (Huygens) "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".

Mais Huygens donne de cette loi une démonstration où nous voyons apparaître clairement un principe énergétique : I1 imagine "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 H ait acquis sa vitesse BC en tombant de la hauteur KB.



Ces hauteurs sont en raison doubles des vitesses :

Cette relation résulte des lois de la chute des corps de Galilée. On remarquera par ailleurs le principe énergétique implicite : sans égard à la direction du mouvement, l'effet énergétique de la chute, qui est caractérisé par la vitesse acquise, se conserve si on "change" le mouvement vertical en mouvement horizontal. Dans ces conditions, Huygens détermine le centre de gravité G correspondant aux positions initiales H et K des corps avant leur chute supposée (intersection de la droite HK avec la verticale de C). On peut alors montrer géométriquement que si, après le choc, la boule A a une vélocité moindre que CA (ce qui entraîne en vertu du principe relativiste de la conservation de la "vitesse relative" de A par rapport à B, que la boule H devra avoir une vélocité supérieure à CB) alors le centre de gravité correspondant aux vitesses des corps après le choc est plus élevé que G. On peut faire la même démonstration dans l'hypothèse que A aurait après le choc une vélocité supérieure à CA. Or, dit Huygens "c'est un axiome constant de la Mécanique que, dans le mouvement de plusieurs corps sous le seul effet de leur gravité, le centre commun de gravité de ces corps ne peut s'élever". Ainsi la seule supposition qui ne conduise pas à un résultat contraire à cet "axiome constant" est que la vélocité de A (et par suite, celle de B) soit la même après le choc qu'avant le choc. On voit ici, à travers un raisonnement passablement compliqué, et même arbitraire, la relation s'établir entre l'énergie liée au mouvement et l'énergie liée à la hauteur. C'est la même constante qui est transférée du cas des deux boules lâchées en H et K, au cas des boules roulant l'une vers l'autre à l'horizontale, puis s'éloignant après avoir rebondi, enfin au cas des deux boules remontées en deux points qui ne peuvent être que H et K, avec un centre de gravité revenu en G.

Enfin, Huygens généralise son traitement au cas général où les vitesses initiales sont quelconques, en opérant un changement de référentiel convenable et en appliquant le principe de la relativité du mouvement. Un fait remarquable est qu'après avoir donné explicitement la solution générale du problème, Huygens s'aperçoit que "la somme des produits de la grandeur de chaque corps dur multiplié par le quarré de sa vitesse est toujours le même devant et après la rencontre". I1 y a conservation de l'expression Smv^2 qu'on appellera plus tard "force vive". Huygens ne dit pas comment il a été conduit à faire cette constatation, mais cela ressort presque directement de la démonstration ci-dessus, et surtout de l'emploi qui est fait de la loi de Galilée mettant en correspondance les hauteurs de chute et les carrés des vitesses. Huygens était bien conduit dans sa démonstration par des intuitions énergétiques attirant l'attention sus la somme des mv^2 et son équivalence avec les produits des poids par les hauteurs. Cette remarque finale, dans laquelle Huygens se montre le précurseur de Leibniz, montre clairement le fil conducteur qui guide la pensée de Huygens dans la démonstration sophistiquée que nous avons reproduite.

C'est à Leibniz qu'il appartenait de constituer quantitativement et précisément le concept de l'énergie liée au mouvement, qu'il appellera force vive. Sa pensée se déroule très progressivement suivant une voie d'abord qualitative et métaphysique, dans laquelle nous chercherons à apercevoir sur le plan psychologique l'intuition de l'énergie.

Dans une première étape, il s'agit seulement d'apprécier, nous dirions presque de ressentir, "l'action" liée au mouvement, plus précisément à la vitesse, sans qu'il soit encore question de la production initiale de cette vitesse, ni de son utilisation finale : "L'action de traverser deux lieues en deux heures est quadruple, et non double seulement, de l'action de traverser une lieue en deux heures : car déjà l'action de traverser une lieue en une heure est double de l'action de traverser une lieue en deux heures ; mais l'action de traverser deux lieues en deux heures est double de celle de traverser une lieue en une heure. Ainsi les actions sont en raison doublée des vitesses". On voit ici Leibniz s'essayant - assez maladroitement - à appliquer une méthode qu'il formulera précisément plus tard (1695) : "J'ai observé jadis, et enseigné que le véritable art d'estimer - non suivi jusqu'à présent, malgré la publication de tant d'éléments de mathématique universelle - consiste en une <u>réduction à quelque chose d'homogène</u>, c'est-à-dire à une répétition exacte et complète, non seulement des modes, mais encore des choses". C'est en vertu de ce raisonnement qu'il est évident que 1 lieue en 1 heure, étant répétée deux fois, fournit 2 lieues en 2 heures, ce qui représente bien une action double. Mais l'action : 1 lieue en 1 heure, ne peut être comparée de cette façon à l'action : 1 lieue en 2 heures, l'homogénéité n'étant ici nullement évidente. Nous ne trouvons ici que l'intuition qu'un mouvement représente comme tel une certaine "action".

Leibniz précise sa pensée à propos d'une critique de la conception cartésienne de la quantité de mouvement : "Brève démonstration d'une erreur mémorable de Descartes" (1686) : "Plusieurs mathématiciens, voyant que dans les cinq machines ordinaires, la vitesse et la masse se compensent, estiment généralement la <u>force motrice</u>

par la quantité de mouvement, c'est-à-dire par le produit du corps par sa vitesse. Pour parler d'une manière plus géométrique, soient deux corps de même espèce en mouvement, agissant à la fois par leur masse et par leur mouvement ; ces savants disent que leurs forces sont en raison composées des corps, c'est-à-dire des masses, et de leurs vitesses. D'autre part, il est conforme à la raison de dire que la même somme de puissance motrice se conserve dans la nature ; que cette somme ne diminue pas, puisque nous n'observons jamais qu'un corps perde aucune force qui ne soit transférée à un autre ; que cette somme n'augmente pas non plus puisque le mouvement perpétuel est à ce point irréel qu'aucune machine, et par conséquent pas même le monde entier, ne peut conserver sa force sans nouvelles impulsions extérieures. Aussi Descartes, qui tenait la force motrice et la quantité de mouvement pour équivalentes, a-t-il déclaré que Dieu conservait la même quantité de mouvement dans le monde. Je veux montrer qu'il y a une grande différence entre la force motrice et la quantité de mouvement".

Nous voyons en ce point que le raisonnement de Leibniz diffère peu du postulat de Descartes. La constance de Dieu est remplacée ici par ce qui est "conforme à la raison" et en outre par l'impossibilité du mouvement perpétuel.Seulement la loi de conservation prend un sens beaucoup plus dynamique, plus qualifié, dirions-nous, car il s'agit ici de "puissance motrice" et l'évidence intuitive du "rien ne se perd, rien ne se crée" prend ici un contenu plus direct et plus évident. On remarquera cependant la dissymétrie des jugements : la force vive ne peut être créée, car cela impliquerait le mouvement perpétuel "irréel". Elle ne peut pas non plus être détruite, parce que "nous n'observons jamais" que des échanges entre corps avec conservation de la force. Cependant, la raison de l'irréalité du mouvement perpétuel est donnée dans une argumentation qui dépasse le but, puisqu'il est remarqué qu'aucune machine, ne peut conserver sa force sans nouvelles impulsions extérieures, ce qui est exact, mais détruit le principe de conservation "observé" plus haut. Ainsi l'intuition très forte qu'il y a dans les corps en mouvement une puissance ou force motrice, n'est rattachée que de façon fragile à l'affirmation que cette force se conserve au total.

Venons-en maintenant à la critique des cartésiens et à une nouvelle évaluation de cette force motrice. "Je veux montrer qu'il y a une grande différence entre la force motrice et la quantité de mouvement. Pour cela je suppose d'abord qu'un corps tombant d'une certaine hauteur acquiert la force d'y remonter si la direction de sa vitesse est convenable et si aucun obstacle extérieur ne l'en empêche". C'est le point où était arrivé Galilée, y compris l'allusion aux résistances, dont on peut "faire abstraction". "Je suppose en outre qu'il faut la même force pour élever un corps A d'une livre à une hauteur CD de quatre aunes que pour élever un corps H de quatre livres à une hauteur

EF d'une aune". C'est le résultat démontré par Descartes à propos de la "force" (travail) des machines simples."Il suit de là que le corps A tombé de la hauteur CD a précisément acquis autant de force que le corps H tombé de EF" en vertu de la "supposition" ci-dessus. Ainsi "la force du corps A en D et celle du corps H en F sont égales".

On peut alors comparer les quantités de mouvement des deux corps aux points D et F de leur chute où leurs "forces" sont égales. Pour cela Leibniz s'appuie sur la loi établie par Galilée : la vitesse acquise au cours d'une chute libre partant du repas est proportionnelle à la racine carrée de la hauteur da chute : ainsi "la vitesse acquise dans la chute CD est double de la vitesse acquise dans la chute EF", alors que les masses sont dans le rapport de 1 à 4. Ainsi il n'y a nullement équivalence entre la "force" et la quantité de mouvement.

Enfin, dans un opuscule écrit en 1692 : "Controverses sur la partie générale des Principes de Descartes", Leibniz précise encore plus clairement sa pensée en se fixant précisément sur les lois des chocs. I1 commence par considérer un corps A de masse 4 et de vitesse 1 qui rencontre un autre corps B de masse 1 qui est immobile, et il suppose que "toute la force de A soit transportée ensuite en B, c'est-à-dire que A soit réduit au repos et qu'à sa place B seul soit en mouvement. On demande quelle vitesse B doit acquérir" (Remarquons que Leibniz ne semble pas se rendre compte que, les conditions initiales déterminant entièrement les mouvements après le choc, il n'est pas légitime de supposer que A sera réduit au repos, la vitesse finale de A résultant univoquement des lois du choc. En fait cette vitesse sera les 3/5 de l'unité choisie). Leibniz se place dans l'hypothèse où le "force" conservée (et donc transmise intégralement de A à B) est exprimée par le produit mv, ce qui donne 4 pour la vitesse finale de B : mv = 4.1 = 1.4. Donc B prend après le choc une vitesse 4. Mais comment comparer valablement la force de deux corps dans des états où ils n'ont pas même vitesse ? Il n'est pas évident "qu'un corps ayant la vitesse double d'un autre n'ait que la puissance double, car quoique le degré de vitesse se trouve une fois répété dans le premier, le sujet du mouvement ne s'en trouve pas doublé" (comme il arrive quand on considère un corps ayant une <u>masse</u> double d'un autre). Quand on rencontre ainsi deux objets qui ne sont pas "complètement homogènes" il faut les comparer indirectement "à savoir par la comparaison des <u>effets homogènes</u> qu'ils produisent, ou de leurs causes homogènes. Car <u>toute cause a la même puissance que l'effet total</u>, c'est-à-dire l'effet qu'elle produit en épuisant sa puissance". C'est ce qu'on va faire avec les corps A et B.

Si le corps A de masse 4, de vitesse 1 peut, en prenant un mouvement ascendant, monter jusqu' à une hauteur d'un pied, alors le corps B de vitesse 4 pourra de même monter jusqu'à une hauteur de 16 pieds, ainsi que l'a démontré Galilée. "Et cet effet dans les deux cas sera total, épuisera la puissance de la cause, et sera donc égal à la cause qui le produit. Mais le premier effet élèvera une masse 4 à une hauteur 1 tandis que le second élèvera une masse 1 à la hauteur 16. Les deux effets sont homogènes et on voit ainsi que le second sera quadruple du premier et de même seront les causes. Ainsi, "si, comme le prétend la théorie vulgaire, B sous-quadruple de A ou égal à un quart du poids de A, recevait la vitesse 4, nous aurions un mouvement perpétuel, ou un effet plus puissant que la cause. Car d'abord, lorsque A était en mouvement, 4 livres pouvaient être élevées à la hauteur d'un pied, ou bien une livre à la hauteur de 4 pieds ; mais ensuite lorsque B a été mis en mouvement, une livre pourrait être élevée à la hauteur de 16 pieds, car les hauteurs d'élévation sont comme les carrés des vitesses par lesquelles elles peuvent être atteintes, et une vitesse 4 fois plus grande élève à une hauteur 16 fois plus grande. Par la force de ce B, nous pourrions donc, non seulement élever de nouveau A à la hauteur d'un pied (d'où il redescendrait pour retrouver sa vitesse primitive), mais), mais encore produire plusieurs autres effets ; ce qui constitue bien un mouvement mécanique perpétuel, puisque, la puissance primitive une fois restituée, un excédent demeure disponible". Si au contraire la "puissance" se mesure par la force vive mv2 alors "il faut répondre que B (de masse 1) doit prendre la vitesse 2, afin d'avoir la même puissance qu'avait A (de masse 4) avec la vitesse 1". Si on fait avec ces nouvelles données le bilan des effets homogènes, on trouve cette fois qu'ils sont égaux, aucune puissance n'a été gagnée ni perdue.

Ajoutons trois remarques :

- D'abord, nous avons vu que l'hypothèse sur quoi repose le calcul de Leibniz (A complètement stoppé par le choc) n'est pas légitime, que la vitesse finale de A ne peut être choisie librement et qu'en fait elle est de 3/5. Ceci ne touche pas au fond du raisonnement de Leibniz, qui résulte de l'estimation des "puissances" par les effets homogènes et comparables qu'elles pourraient produire en faisant monter verticalement les corps. Par contre, l'hypothèse erronée amènera Leibniz, dans des controverses ultérieures, à affirmer "qu'il se peut et même se doit faire que la quantité de mouvement soit diminuée ou augmentée dans les corps pendant que la même force demeure" (Lettre à l'abbé de Conti). Effectivement, si les vitesses finales sont $V_A = 0$ et $V_B = 2$ de façon à respecter la conservation de la force vive, la quantité de mouvement qui était 4.1 est devenue 1.2. En réalité - et Leibniz, donnera plus tard la solution générale et complète du problème des chocs élastiques tenant compte de la conservation de la "quantité de progrès", vectorielle, Smv - la solution unique est, pour les vitesses après le choc : $V_A = 3/5$ et $V_B = 8/5$, ce qui assure, comme on le vérifiera aisément, et la conservation de la force vive, et celle de la quantité de progrès, laquelle dans ce cas (vitesses de même sens) se confond avec la quantité de mouvement cartésienne.

- Notre deuxième remarque sera pour nous justifier d'avoir accordé tant d'importance à l'établissement de la conservation de la force vive dans le choc (élastique) de deux corps. I1 y a d'autres lois de conservation, qui sont énoncées par Leibniz lui-même dans "l'Essai de dynamique" de 1692. Ce sont la conservation de la "vitesse relative (ou valeur absolue de la différence des vitesses des deux corps), et la conservation de la "quantité de progrès que Newton appellera proprement quantité de mouvement. Leibniz privilégie explicitement la force vive parce que, dit-il, ni la vitesse relative, ni le progrès total ne regardent "ce qu'il y a d'absolu dans les corps" ; alors que la force, qu'on ne doit surtout pas confondre avec la quantité de mouvement, tant qu'elle est estimée par "l'Effet violent" qu'elle peut par l'effet "qui consume la force de l'agent".

- Notre troisième remarque sera pour signaler les difficultés rencontrées par Leibniz pour réconcilier la loi de l'égalité des travaux établie pour les machines simples dans les états d'équilibre, et la loi de la conservation de la force vive. Déjà, dans le "Brève démonstration" il note : "D'ailleurs qu'on ne s'étonne pas si, dans les machines ordinaires... l'équilibre a lieu lorsque la grandeur d'un des corps est compensée par la vitesse que la disposition de la machine donnerait à l'autre, c'est-à-dire lorsque les grandeurs… sont réciproquement comme les vitesses, c'est-à-dire encore lorsque la même quantité de mouvement tend à se produire de part et d'autre. Là en effet il arrive encore que de part et d'autre les quantités d'effet futures sont égales - nous voulons dire les hauteurs de descente ou d'ascension - de quelque côté que l'équilibre soit rompu. Ainsi, il arrive là par accident que la force peut être estimée par la quantité de mouvement. Mais il y a d'autres cas, comme celui que nous avons signalé plus haut, où cette coïncidence n'existe plus".

Ce texte obscur tente d'intégrer dans une même loi - en utilisant le même vocable de force - le travail virtuel exécuté par un des poids dans une machine simple en équilibre (et dans l'éventualité d'une rupture de l'équilibre) et le travail réel de ce même poids lorsqu'il tombe librement et prend une certaine vitesse. L'intervention des vitesses dans le cas de l'équilibre, et lorsque ces vitesses sont seulement infiniment petites, n'est qu'un artifice pour comparer les déplacements virtuels (ou actuels) des poids lors du passage d'un état d'équilibre à un autre. L'assimilation de ce calcul, qui, comme nous le dirions aujourd'hui, ne met en jeu que les énergies potentielles, au calcul des forces vives qui porte sur l'énergie cinétique, est difficile à soutenir. Dans la suite, Leibniz éclaire la question en introduisant la distinction entre "forces vives" et "forces mortes' ("Spécimen dunamicum" 1695).

"Le mouvement est un continuel changement de lieu, il a donc besoin du temps. Un mobile en mouvement, comme il a du mouvement dans le temps, de même à un certain instant une vitesse ... L'impetus est le produit de la masse du corps par sa vitesse, et sa quantité est ce que les cartésiens appellent d'habitude quantité de mouvement… le nisus est double : il y a le nisus élémentaire ou infiniment petit que j'appelle sollicitation, et celui qui est formé par la continuation ou répétition des nisus élémentaires, c'est l'impetus lui-même. La force aussi est double. La force élémentaire, que j'appelle aussi force morte parce qu'en elle n'existe pas encore de mouvement, mais seulement une sollicitation au mouvement, est comme celle de la pierre dans la fronde, tant qu'elle est retenue par la corde. L'autre est la force ordinaire, unie au mouvement actuel et je l'appelle force vive.

"Des exemples de force morte sont donnés par la force centrifuge, par la gravité ou force centripète, par la force avec laquelle un ressort tendu commence à se débander. Mais dans la percussion produite par un grave tombant déjà depuis quelque temps, ou par un arc se débandant pendant quelque temps, ou par toute autre cause, la force est vive et elle naît d'une infinité d'impressions continues de la force morte".

L'identification de ces notions en termes de mécanique moderne (proposée pour l'essentiel par René Jouguet[1]) permet de voir tout à fait clair dans la pensée de Leibniz. La force morte, c'est la force au sens newtonien, et aussi au sens de la statique des forces en équilibre ("Les anciens autant qu'on le sait, n'eurent que la science des forces mortes ; c'est celle qu'on appelle Mécanique et qui traite du levier, de la vis, du plan incliné, de l'équilibre des liqueurs et d'autres problèmes semblables ; on n'y étudie que le premier conatus des corps entre eux, avant qu'ils n'acquièrent un impetus par leur action"). Comme on le sait il y a deux méthodes pour évaluer l'effet intégral d'une force : ou bien on évalue l'impulsion élémentaire de la force $\vec{F}.dt$. dont l'intégrale (à partir du repos) est $\int \vec{F}.dt = m.\vec{v}$ soit la quantité de mouvement. L'impulsion élémentaire, c'est chez Leibniz le nisus élémentaire ou sollicitation, et son intégrale est l'impetus ("L'impetus, quoiqu'étant chose momentanée, est fait d'une infinité de degrés imprimés successivement au mobile. I1 a un certain élément de l'infinie répétition duquel il peut naître"). Ou bien on évalue le travail élémentaire de la force F.dl, dont l'intégrale (à partir du repos) est F.dl = 1/2 m v^2, soit l'énergie cinétique qui doit bien entendu être assimilée à la force vive de Leibniz. En résumé, Leibniz sent bien qu'il y a deux manières de former "une infinité d'impressions continuées de la force morte" et qu'on

[1] R. Jouquet. Etudes de Dynamique p. 196, note 209.

doit pouvoir intégrer, soit des éléments d'impetus, qui sont des "sollicitations", soit des éléments de force vive, pour lesquels il n'a pas su former un concept explicite. En tous cas à partir de ce point il apparaît clairement que force vive et force morte ne sont pas des grandeurs de même nature, même si le caractère vectoriel de la seconde et le caractère scalaire de la première ne paraissent pas avoir été aperçus.

Dans ces deux approches de la force par ses effets se dissimule la dualité qui provoquera entre leibniziens et cartésiens la "querelle des forces vives", qui revenait à valoriser exclusivement soit l'énergie cinétique (et donc le travail) soit la quantité de mouvement (et donc l'impulsion). C'est donc le type d'un faux problème puisque, comme nous le savons aujourd'hui, les deux notions antagonistes correspondent à deux lois de conservation distinctes. Néanmoins pour le sujet qui nous occupe, c'est le point de vue leibnizien qui est important car la notion d'énergie cinétique - plus tard d'énergie mécanique - est celle qui peut être généralisée à d'autres domaines de la physique pour former le concept général d'énergie. Remarquons encore que la conservation de l'énergie mécanique est une loi moins générale que celle de l'impulsion. Elle suppose que les forces en action (au sens moderne) soient d'un type particulier (gradient) ou que les chocs soient parfaitement élastiques. Dans les chocs réels, l'énergie mécanique ne se conserve pas. Et c'est précisément ce qui fait l'intérêt de cette notion car lorsqu'elle ne se conserve pas, elle se transforme en chaleur, donnant ainsi un exemple très général de transformation de l'énergie.

Il est important de signaler que, après Leibniz, les spéculations sur la "force" des corps en mouvements ont marqué le pas, et sauf des discussions stériles sur ce qui est ou non fondamental dans le puissance efficiente des corps, les notions énergétiques sortant du champ de développement de la Mécanique. C'est que le cours donné à cette science par l'œuvre de Newton fait des idées énergétiques des notions marginales, et beaucoup de scientifiques pensent qu'elles se situent en dehors de la physique : Témoin D'Alembert (1743) : "Comme nous n'avons d'idée précise et distincte du mot de force qu'en restreignant ce terme à exprimer un effet, je crois qu'on doit laisser chacun le maître de se décider comme il voudra là-dessus, et toute la question ne peut plus consister que dans une discussion métaphysique très futile ou dans une dispute de mots plus indigne encore d'occuper des philosophes".

C'est seulement à partir de la fin du XVIIIe siècle qu'on a commencé à attribuer à nouveau de l'importance à la "force-vive" et aux cas où elle se conserve, et qu'on a cherché à rattacher cette notion aux "principes" de la dynamique et à délimiter les cas dans lesquels les principes peuvent faire prévoir une conservation. Au niveau de la "Mécanique Analytique" de Lagrange (1788), on voir surgir de calculs très abstraits l'expression 1/2 mv^2. Lagrange précise bien que les conditions de sa démonstration sont que "les équations entre les coordonnées des différents corps ne renferment pas le temps" (ce qui revient à dire que les forces ne dépendent pas explicitement du temps) et il choisit, au lieu de déplacements "virtuels" quelconques, conformes au principe de D'Alembert, des déplacements "qui représentent les espaces effectifs parcourus par les corps dans l'instant dt". Dans ces conditions le principe d'intégrale stationnaire de Lagrange prend la forme

$$\int \left(\frac{dx.d^2x + dy.d^2y + dz.d^2z}{dt^2} + Pdp + Qdq + Rdr + ...\right)m = 0$$

où p, q, r, ... sont les variables de configuration généralisée et où P(p,q,r ..). Q(p.q.r.) . R(p.q.r.), .., représentent les forces généralisées associées aux variables p, q, r ... Alors, ajoute Lagrange "dans le cas où la quantité P.dp + Q.dq + R.dr + ... est intégrale, lequel a lieu lorsque les forces P, Q, R tendent à des centres fixes où à des corps du même système, et sont fonction des distances p, q, r, ..., en faisant

P.dp + Q.dq + R.dr ... = dΠ (p,q,r)

L'équation précédente devient :

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

dont l'intégrale est

$$\int \left(\frac{dx.d^2x + dy.d^2y + dz.d^2z}{dt^2} + \Pi\right)m = H$$

dans laquelle H désigne une constante arbitraire égale à la valeur du premier membre de l'équation à un instant donné[2]. Cette dernière équation renferme le principe connu sous le nom de "conservation des forces vives". En effet dx^2 + dy^2 + dz^2 étant le carré de l'espace que le corps parcourt dans le temps dt, $(dx^2 + dy^2 + dz^2)/dt^2$ sera le carré de sa vitesse et $m(dx^2 + dy^2 + dz^2)/dt^2$ sa force vive. Donc $\int \left(\frac{dx.d^2x + dy.d^2y + dz.d^2z}{dt^2}\right)m$ sera la somme des forces vives de tous les corps, ou la force vive de tout le système, et l'on voit par l'équation dont il s'agit que cette force vive est égale à la quantité $2H - 2\int \Pi m$, laquelle dépend simplement des forces accélératrices qui agissent sur les corps, et nullement de leurs liaisons mutuelles de sorte que la force vive du système est à chaque instant la même que les corps auraient acquise, si, étant animés par les mêmes puissances, ils s'étaient mus librement, chacun sur la ligne qu'il a décrite. C'est ce qui a fait donner le nom de <u>conservation</u> des forces vives à cette propriété du mouvement".

René Jouguet, à qui nous empruntons cette citation, en conclut allègrement que la relation de Lagrange contient l'impossibilité du mouvement perpétuel, que si on suppose que l'expression Pdp + Qdq + Rdr + ... contient une partie qui soit intégrale et une autre qui ne le soit pas, cette dernière représentera de l'énergie dissipée en chaleur, enfin que, si l'expression ci-dessus est entièrement intégrale, l'expression $\int (1/2v^2 + \Pi)m$ qui reste constante, "peut être prise comme définition de la <u>force</u> du système en mouvement" c'est-à-dire, si nous comprenons bien, de son énergie. Cela est bel et bien, mais nous ne trouvons pas dans Lagrange ces précisions et identifications. La notion qui fait défaut, c'est celle <u>d'énergie potentielle</u>, convenablement représentée par la fonction $\int \Pi m$: intégrale du travail élémentaire de la force généralisée. Il nous parait très caractéristique que Lagrange ne reconnaisse pas, dans les expressions analytiques qu'il exhibe, les intuitions énergétiques fondamentales, et qu'il n'explicite pas son résultat comme exprimant la conservation d'une énergie mécanique totale, somme de la demie force vive (ou énergie cinétique) et d'une énergie "potentielle" formée par intégration du travail élémentaire des "forces accélératrices". Ainsi à un niveau très élevé d'élaboration des concepts de la mécanique, le concept général d'énergie mécanique n'est pas constitué comme tel, parce que le concept d'énergie potentielle ou statique n'a pas été clairement formé.

Preuve en soit qu'à la même époque le physicien Thomas Young, lorsqu'il reprend les idées énergétiques, (en employant du reste explicitement le terme d'énergie) ne fait pas mention des savants travaux mathématiques de Lagrange, mais seulement des démonstrations, si particulières et si frustes, de Leibniz et de son école, dans un texte qui se réfère à des phénomènes très simples de la vie courante pour caractériser le rôle actif de la force vive des corps "Le terme d'énergie peut être appliqué de façon très pertinente au produit de la masse (ou du poids) d'un corps par le carré du nombre exprimant sa vitesse... Ce produit a été appelé force vive ou force ascendante car la hauteur verticale jusqu'à laquelle le corps peut monter lui est proportionnelle ; et certains savants l'ont considérée comme la vraie mesure de la "quantité de mouvement" ; mais bien que cette opinion ait été universellement rejetée, cependant, la force calculée ainsi appelle une dénomination spéciale".

2 Il est amusant de noter que la constante H appelée fonction de Hamilton ou hamiltonien en mécanique moderne (formalisme canonique), est par coïncidence désignée par l'initiale de Hamilton dans le mémoire de Lagrange à une date où Hamilton était âgé de trois ans !

"Après les considérations et démonstrations ci-dessus au sujet des "forces", on ne peut raisonnablement douter de ce qui est la vraie mesure du mouvement ; on ne peut pas non plus hésiter longtemps à affirmer que, puisque la même force, exercée pendant un temps double, produit une vitesse double, une force double doit aussi produire une vitesse double dans un même temps. Nonobstant la simplicité de cette approche du sujet, Leibniz, Smeaton et beaucoup d'autres ont choisi d'estimer la force d'un corps en mouvement par le produit de sa masse et du carré de sa vitesse ; et bien que nous ne puissions admettre que cette évaluation de la force soit correcte, cependant, on peut alléguer que beaucoup d'effets sensibles du mouvement, et même l'utilité de toute puissance mécanique, de quelque façon qu'elle soit employée, sont généralement proportionnels à ce produit, ou encore au poids du corps en mouvement multiplié par la hauteur d'où on aurait dû le laisser tomber pour lui communiquer la vitesse considérée".

"Ainsi un boulet se déplaçant avec une vitesse double pénétrera dans une couche de glaise ou dans une couche de suif à une profondeur quadruple : un projectile de même grandeur, mais ayant un poids quatre fois plus petit, se mouvant avec une vitesse double pénétrera à une profondeur égale, et avec une quantité de mouvement plus petite, fera un trou égal (dans un temps plus court). Ce qui, à première vue, paraîtra quelque peu paradoxal. Mais, d'un autre côté, nous devons considérer la résistance de la glaise ou du suif comme une force produisant un mouvement uniformément retardé, et il sera alors évident que le mouvement que cette résistance peut détruire en un temps très court sera moins important que celui qui exigerait un temps plus long pour être anéanti. Ainsi, lorsque la résistance opposée par un obstacle à une force tendant à la rompre, sera surmontée, et si on se donne la grandeur de la déformation qu'il subira avant de se rompre, ainsi que la force exercée à chaque étape de la déformation, alors la puissance dégagée par un corps quelconque pour rompre cet obstacle sera proportionnelle à l'énergie du mouvement de poids multiplié par la carré de sa vitesse".

L'allusion à la hauteur de chute montre bien qu'à cette époque les physiciens comme Young en étaient restés à la démonstration élémentaire de Leibniz mettant en jeu exclusivement le mouvement de chute ou d'ascension des corps pesants, mais dans le cadre d'une intuition physique de plus en plus riche de l'énergie de mouvement caractérisée par ses effets. D'un autre côté, les mathématiciens comme Lagrange avaient fait surgir l'énergie cinétique d'une démonstration tout à fait générale. Mais, ni les uns ni les autres n'ont, à la fin du XVIIIe siècle, explicité nettement le théorème de la conservation de l'énergie mécanique totale, comme conséquence des principes de la dynamique.

Il faut attendre le milieu du XIXe siècle pour trouver un texte - contemporain des découvertes décisives de Mayer et Joule sur l'équivalence du travail et de la chaleur - dans lequel Helmholtz introduit explicitement - mais encore sous le nom de force (Kraft) - la notion d'énergie mécanique totale et la détermination des conditions dans lesquelles cette énergie reste constante. Dans son mémoire de 1847 "Ueber die Erhaltung der Kraft", Helmholtz part du principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel ("impossibilité, par quelque combinaison que ce soit de corps naturels, de produire une quantité illimitée d'énergie mécanique) et l'application au principe bien connu de conservation de la "force vive" (pour laquelle il est le premier à proposer l'expression _m v^2 au lieu de mv^2). Ce principe, sous sa forme classique, affirme que "quand un nombre quelconque de points matériels sont mis en mouvement uniquement par des forces qu'ils exercent les uns sur les autres, ou qui sont exercées par des centres fixes, alors la somme totale des forces vives est la même, toutes les fois que ces points occupent les mêmes positions relatives, et quelques qu'aient pu être les trajectoires parcourues par ces points et les vitesses qu'ils ont eues dans l'intervalle".

Helmoltz démontre alors que les conditions d'application de cette conservation sont plus strictes : pour qu'il y ait égalité de la somme des forces vives pour tous les cas où la configuration du système de points est la même, il est nécessaire "que les forces en action puissent être ramenées à des forces mutuelles entre deux points matériels, qui agissent suivant la droite qui les joint et dont l'intensité ne dépend que de leur distance" ; c'est-à-dire qu'elles soient du type qu'on nomme en mécanique forces centrales.

Dès lors, l'application du principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel permet à Helmholtz de démontrer une proposition généralisant le principe des forces vives, et qui constitue une énergie mécanique totale qui demeure constante au cours du temps : "De quelque façon que ces corps naturels agissent les uns sur les autres, pourvu que ce soit par des forces attractives ou répulsives indépendantes du temps ou de la vitesse, la somme de leurs forces vives et de leurs "tensions" doit demeurer constante ; la quantité maximum de travail qui peut être produite est par conséquent une quantité limitée".

On sait aujourd'hui (et cela est déjà impliqué par la proposition de Lagrange citée p30) que la condition pour qu'il y ait conservation de l'énergie mécanique totale, est que les forces mutuelles entre deux points matériels aient la forme du "gradient" d'une fonction "énergie potentielle". C'est le concept qu'Helmholtz désigne par le mot "tension". Cette condition est plus large que celle de Helmholtz, bien que dans la pratique on rencontre surtout les forces dites "centrales", comme exemple de forces "dérivant" d'une énergie potentielle. Helmholtz énonce donc ici, pour la première fois, et sous une forme à peine restrictive, le principe de conservation de l'énergie mécanique. Helmholtz ajoute deux conséquences :

1°-) Si au contraire, des corps naturels peuvent développer des forces qui dépendent du temps et de la vitesse, ou qui agissent dans des directions autres que les lignes droites qui joignent deux points matériels, par exemple des forces "rotationnelles", alors il est possible de former des systèmes de tels corps dans lesquels de l'énergie puisse être soit perdue soit créée ad infinitum",

2°-) Dans le cas où on a seulement des forces centrales, "un système rigide de corps en équilibre ne pourra être mis en mouvement par la seule action de ses forces internes, mais seulement par l'action de forces extérieures. Si, au contraire, il existe d'autres forces que des forces centrales, on pourra former des systèmes rigides de corps en équilibre qui pourraient se mouvoir d'eux-mêmes sans que soit nécessaire une action quelconque d'autres corps".

Dans la première de ces deux propositions, la conclusion mettant en jeu la création indéfinie d'énergie est contraire au principe de l'impossibilité du mouvement perpétuel. On pourrait donc en tirer la conclusion (évidemment erronée) que dans "la nature" il n'existe que des forces centrales. Mais il y a aussi le cas où de l'énergie mécanique est perdue "ad infinitum", qui correspond évidemment au cas des forces "naturelles" dépendant de la vitesse, telles que les forces de frottement et de résistance des fluides. C'est précisément le cas où l'énergie mécanique se convertit en chaleur, et on voit combien Helmholtz était près de l'extension du principe de conservation de l'énergie à d'autres formes que l'énergie mécanique. Cette extension, ses contemporains Mayer et Joule étaient précisément en train de s'y jeter.