À propos de la loi fondamentale de la dynamique

Yves De Rop

Dans un précédent article (voir *Isaac Newton*, dans *Le Ciel* du mois de juin, page 148), nous avons vu le cheminement heuristique de Newton pour arriver à l'établissement de la relation fondamentale de la dynamique à partir de l'observation des mouvements planétaires. C'est la loi qu'Euler écrira plus tard sous la forme $F = ma$, clef de voûte de la mécanique classique, et probablement la première équation de l'histoire de la physique. Nous voudrions nous attarder un peu sur les concepts que la loi de Newton met en scène, et spécialement ceux de *force* (F) et de *masse* (m). En ce qui concerne l'accélération a, nous la définirons simplement comme étant la variation de vitesse par unité de temps, sans insister sur les nombreux problèmes liés à la définition du temps et de l'espace. Ceci étant, quel statut épistémologique peut-on donner à la loi de Newton ? Définit-elle la force ? Ou la masse ? Et s'il ne s'agit que d'une définition, quelle est la part de l'expérience ?

« Les traités de mécanique ne distinguent pas bien nettement ce qui est expérience, ce qui est raisonnement mathématique, ce qui est convention, ce qui est hypothèse », remarque H. Poincaré (1) dans sa critique des fondements de la mécanique classique. Mais tout d'abord, qu'est-ce qu'une force ?

« L'idée de force est une notion primitive, irréductible, indéfinissable ; nous savons tous ce que c'est, nous en avons l'intuition directe. Cette intuition directe provient de la notion d'effort, qui nous est familière depuis l'enfance. Mais d'abord, quand même cette intuition directe nous ferait connaître la véritable nature de la force en soi, elle serait insuffisante pour fonder la Mécanique ; elle serait d'ailleurs tout à fait inutile. Ce qui importe, ce n'est pas de savoir ce que c'est que la force, c'est de savoir la mesurer » (1).

Maintenant, afin de mieux comprendre dans quelle mesure la loi de Newton est une vérité tirée de l'expérience, imaginons la situation suivante. Un corps A est posé sur une table horizontale parfaitement lisse. (« Parfaitement lisse » signifie que le principe d'inertie de Galilée-Descartes est applicable : tout objet, une fois lancé sur la table, continuerait à se mouvoir indéfiniment de façon rectiligne et uniforme.) Pour fixer les idées, supposons que le corps soit initialement au repos. Par l'intermédiaire d'un ressort, on tire horizontalement sur ce corps, de telle façon que le ressort s'allonge d'une longueur donnée, α. Il est raisonnable d'admettre que dans ces conditions, le corps A est soumis à une force constante : c'est le principe du *dynamomètre*.

Que constatons-nous ? Le corps A se met en mouvement avec une accélération constante a. Que la cause du mouvement soit liée directement à l' *accélération* des corps, voilà une découverte qui à elle seule aurait suffi à rendre son auteur célèbre, tant il est vrai que depuis deux mille ans c'est plutôt à la *vitesse* que l'on associait la force : « Du mouvement selon le lieu, Aristote dit explicitement que, lorsqu'une force ou puissance est exercée sur un mobile, le rapport des distances parcourues est égal au rapport des temps de parcours », « qu'une distance égale est parcourue dans un même temps si la force et le mobile (son poids) sont dans la même proportion », « que le rapport des forces exercées sur un mobile est égal au rapport des distances parcourues dans un même laps de temps pourvu que ces forces aient une intensité qui dépasse un certain seuil en-dessous duquel celles-ci ne peuvent agir » (sinon un seul homme halerait le navire que plusieurs déplacent à grand peine) (2).

Attachons ensuite le ressort à un autre corps, B, et tirons sur le ressort avec une force identique, donc telle que l'allongement du ressort soit à nouveau α. Le corps B prend une accélération b différente de a, ce qui en soi n'a rien de surprenant. Ce qui est intéressant par contre, c'est que si on renouvelle cette expérience pour les corps A et B avec une autre force, correspondant à un allongement α' du ressort, on obtient respectivement deux accélérations a' et b' *dans le même rapport*. En d'autres termes, pour autant que l'on se donne un système d'unités, l'expérience nous révèle une propriété mathématique, un nombre, invariablement attaché à chaque corps : c'est sa *masse inerte*.

Tout ceci satisfait notre besoin de logique. On pourrait s'imaginer que notre dynamomètre permet de comparer deux forces, et, partant, de définir de proche en proche une échelle de forces. Il suffirait pour cela de les accrocher successivement au ressort comme on attelle une locomotive à un train. Par exemple, je peux attacher au ressort, tenu verticalement, un dm^3 d'eau pure à 4° C, et dire que l'allongement correspondant, dû au poids de l'eau, mesure une force unité. Un étalonnage très naturel consiste dès lors à faire correspondre une force F à l'allongement résultant de la suspension d'un volume d'eau F fois plus grand. L'ensemble des opérations décrites ci-dessus constitueraient alors une procédure opérationnelle auto-consistante pour déduire de l'expérience la seconde loi de Newton.

Cependant, il n'en est rien, comme le fait remarquer H. Poincaré (1) : une analyse attentive du problème montrerait que nous avons en effet implicitement admis que *si un corps est attaché au ressort, l'effort (l'action) qui lui est transmis par le ressort est égal à la réaction que ce corps exerce sur le ressort.* « En définitive, nous nous sommes servis du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, en le considérant, non comme une vérité d'expérience, mais comme la définition même de la force ». Devant ces difficultés, Poincaré se rallie au clan des nominalistes : *par définition*, la force est égale à la masse multipliée par l'accélération.

Max Jammer (3) explique que selon les conceptions modernes, la force n'est en fait plus qu'un intermédiaire méthodologique entre une configuration physique X et le mouvement qui en résulte : $ma = F$, $F = \phi(X)$, donc $ma = \phi(X)$. Pour une autre particule de masse m' placée dans la même configuration, on aura une autre accélération a' telle que $m'a' = ma = \phi(X)$.

« The constancy of this product with respect to the various test bodies suggests our giving it a name of its own : we call it « force ». Such a nominal definition (force = mass × acceleration) is of course an analytic statement or a tautology, as every nominal definition is. These remarks, it is hoped, will clarify the much-disputed logical status of Newton's second law : it is an empirical statement with respect to the fact that just the product « mass times acceleration » is a single-valued function of the configuration X. It is an analytic statement with respect to the nominal definition of force ». *

Voici la position de Feynman (4) sur ce problème :

« The real content of Newton's law is this : that the force is supposed to have some *independent properties*, in addition to the law $F = ma$; but the *specific* independent properties that the force has were not completely described by Newton or by anybody else, and therefore the physical law $F = ma$ is an incomplete law. It implies that if we study the mass times the acceleration and call the product the force, i.e., if we study the characteristics of force as a program of interest, then we shall find that forces have some simplicity; the law is a good program for analyzing nature, it is a suggestion that the forces will be simple. Now the first example of such forces was the complete law of gravitation, which was given by Newton ».**

Voyons enfin le point de vue de Newton lui-même, dans la préface de la première édition des « Principia » : « Omnis enim philosophiae difficultas in eo versari videtur, ut a phaenomenis motuum investigemus vires naturae, deinde ab his viribus demonstremus phaenomena reliqua ». (« Car toute la difficulté de la philosophie semble consister en ceci : l'investigation des forces de la nature à partir de l'observation phénoménologique des mouvements et ensuite à partir de ces forces la démonstration des autres phénomènes ».)

En résumé, en énonçant le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, Newton ne donnait en fait qu'une des propriétés des forces. Ce « principe » devrait être inclus *par définition* dans une théorie générale des forces, complément indispensable de la seconde loi de la dynamique, expliquant comment calculer ces dernières à partir d'une configuration donnée. Dans le cas de la gravitation, il s'agit de la loi en l'inverse du carré de la distance.

Cependant, tout écart expérimental à la loi pourrait être résorbé en modifiant la théorie des forces, notamment en supposant qu'on n'a pas pris en compte tous les paramètres définissant la configuration. Expliquons-nous par un exemple. Au XIXe siècle, on a constaté des anomalies dans le mouvement de la planète Uranus. Au lieu d'incriminer la physique newtonienne, l'astronome français Urbain Le Verrier a postulé sa validité et l'a utilisée pour prédire l'existence d'une nouvelle planète, Neptune. L'existence de celle-ci fut bientôt confirmée par l'observation.

Mais, nous répondra-t-on, que serait-il arrivé si Neptune n'avait pas été observée ? Autrement dit, si la loi de Newton était fausse, l'expérience nous permettrait-elle quand même de nous en rendre compte ?

En fait l'histoire des sciences nous permet de répondre à cette question. Lorsque le même Le Verrier a découvert des anomalies dans le mouvement de la planète Mercure, il a naturellement d'abord tenté de sauver la loi de Newton en invoquant une mystérieuse planète, Vulcain, située entre Mercure et le Soleil. Sans succès. On essaya alors de modifier la loi de l'attraction gravitationnelle de manière *ad hoc*, mais chaque fois on se heurtait à des difficultés pour expliquer le mouvement des autres planètes. En définitive, c'est la théorie de la relativité générale d'Einstein qui permit d'interpréter le phénomène, sur des bases conceptuellement très différentes de la théorie de Newton. Est-ce à dire que cette dernière est incorrecte ? Du point de vue de la stricte logique, non. On pourrait en effet toujours retomber sur ses pieds en choisissant une théorie des forces où ces dernières sont *définies* par $F = ma$. Cela ne serait pas moins logique que de poser sans justification, comme l'a fait Newton, une loi en l'inverse du carré de la distance. Mais ce serait moins *simple* : contrairement à la relativité générale cette « loi » deviendrait très vite si artificielle et compliquée qu'elle ne serait plus qu'une tautologie sans aucun pouvoir prédictif, et donc sans aucune utilité. On se rappellera les systèmes *géocentriques* dans l'histoire de l'astronomie, accumulant épicycles, déférents et équants jusqu'à ce que des observations plus précises remettent constamment en cause tout l'édifice.

Ainsi, l'expérience sert de base aux principes de la mécanique et cependant ne peut les contredire du point de vue logique. La mécanique devrait alors être interprétée comme une convention, mais non arbitraire dans la mesure où une théorie des forces doit toujours rester raisonnablement simple pour être utile. Encore faudrait-il s'entendre sur ce mot. Tout ce que l'on peut dire, c'est que, apparemment, deux êtres humains de cultures pas trop différentes sont *grosso modo* d'accord pour trouver simples les mêmes choses. (Au lecteur de juger si cette phrase ne constitue pas elle-même une tautologie !) La soi-disant objectivité de notre science n'est donc en fait peut-être que le délire collectif d'une partie de l'Humanité. Quoi qu'il en soit, il s'avère que les deux seules interactions reconnues en définitive par la physique classique, à savoir la gravitation et l'électromagnétisme, satisfont au critère de simplicité.

Une dernière remarque. Pour intuitive qu'elle soit, la notion de force est généralement assez mal comprise. Historiquement, on l'a souvent confondue avec deux notions dérivées et d'ailleurs plus parlantes, l'*impulsion*, c'est-à-dire le produit de la force par le temps durant lequel elle agit, et le *travail*, c'est-à-dire le produit (scalaire) de la force par la distance sur laquelle elle agit. D'Alembert (1717–1783) fut un des premiers à établir clairement la distinction entre ces deux concepts, que nous allons expliquer brièvement.

Une pierre lâchée depuis une hauteur de 10m ne possède pas, comme on le croit parfois, une force plus grande qu'une pierre identique immobile à terre. La seule force qu'on peut attacher à ces deux corps, c'est leur poids, et celui-ci ne dépend pas de la vitesse. Ce qui les distingue, c'est la *quantité de mouvement*, égale au produit de la masse par la vitesse, et que Descartes, dans ses *Principes de la philosophie*, appelait simplement le *mouvement* : « ...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 autant de mouvement dans la plus petite que dans la plus grande... ». La force de gravitation, le poids, agit pendant un certain temps (d'où *impulsion*) sur la pierre lâchée d'une hauteur de 10 m et lui confère une certaine quantité de mouvement. Une telle pierre qui nous tombe sur la tête est plus dangereuse que la même pierre délicatement déposée sur le crâne parce que ce dernier doit absorber une grande quantité de mouvement en un temps très court, d'où risque de fracture.

Quant au concept de *travail*, son intérêt apparaît dès l'Antiquité, dans l'étude des machines simples. Par exemple, un plan incliné permet de soulever des objets lourds à moindre effort, mais le prix à payer est un déplacement plus long que le déplacement vertical. Au total, c'est le travail dépensé (ou encore, l'*énergie* fournie à l'objet) qui est le même dans les deux cas, et pas du tout la force déployée. Max Jammer (3) constate d'ailleurs que la science contemporaine confère à l'énergie un rôle plus fondamental que la force :

> « In recognition of the highly abstract character of the concept of force, modern physics saw some justification in modifying its logical status and considering it as based on the concept of work or energy. In fact, it is often claimed that the concept of work or energy has a more decisive and fundamental role in present-day physics than that of force, and in usurping the concept of force by energy, only more justice is done to the physical nature of force. In consequence of considerations such as these, force is defined as the space rate of change of energy ».***

Notes

* « La constance de ce produit, quelles que soient les masses en jeu, suggère qu'on lui donne un nom : nous l'appellerons la « force ». Une telle définition nominale (force = masse × accélération), comme toute définition nominale, n'est bien sûr qu'une tautologie, une simple déclaration. Mais on peut espérer que ces remarques éclaireront la position logique très controversée de la seconde loi de Newton : c'est un énoncé empirique reconnaissant le fait que le produit masse × accélération est simplement une fonction univoque de la configuration X. C'est un énoncé analytique de la définition nominale de la force. »

** « Le contenu réel de la loi de Newton est le suivant : la force est supposée avoir certaines *propriétés indépendantes*, outre la loi $F = ma$; mais les propriétés indépendantes *spécifiques* de la force n'ont été décrites ni par Newton, ni par personne d'autre, de sorte que la loi $F = ma$ est incomplète. Ceci implique que si nous étudions le produit de la masse par l'accélération, et que nous l'appelons la force, c'est-à-dire si nous étudions les caractéristiques de la force comme un programme d'intérêt, alors nous trouverons quelque simplicité dans les forces ; la loi est un bon programme pour analyser la nature ; elle suggère que les forces sont simples. Maintenant le premier exemple d'une telle force a été la loi complète de la gravitation donnée par Newton. »

*** « Reconnaissant le caractère très abstrait du concept de force, la physique moderne a vu quelque justification à modifier son statut logique et à le baser sur le concept de travail ou d'énergie. En fait, on entend souvent dire que le concept de travail ou d'énergie a un rôle plus décisif et fondamental que celui de force et, si l'énergie usurpait le concept de force, ce ne serait que rendre justice à la nature physique de la force. En conséquence de telles considérations la force se définit comme le taux de changement spatial de l'énergie. »

* * *

Références

1. H. Poincaré, « La science et l'hypothèse », chapitre VI, Flammarion, 1968.
2. R. Locqueneux, « Histoire de la physique », Que sais-je ? n°421, Presses universitaires de France, 1987.
3. M. Jammer, « Concepts of force », chapitre 12, Harvard University Press, 1957.
4. R. Feynman, « The Feynman lectures on physics », vol.1, chapitre 12, Addison-Wesley, 1975.