



Georges Leterme

**VOYAGE
DANS LA
PHYSIQUE
MODERNE**

ellipses



Quelques aspects fondamentaux de la mécanique classique

Le poids et la masse — Le principe d'inertie — L'énergie mécanique d'un système : potentielle et cinétique — Les référentiels — Le principe de relativité restreinte de Galilée — L'espace absolu et le temps absolu de Newton — La transformation de Galilée — L'attraction universelle de Newton

C'est principalement en *dynamique*, étude des causes du mouvement et leurs effets, que nous allons porter notre attention. Nous savons que ces causes sont des forces, mais c'est d'abord en *statique* que la notion de force s'est le plus clairement dégagée et que l'expérience a pu établir la loi selon laquelle la résultante de plusieurs forces, représentées par des vecteurs, s'obtient par l'addition *géométrique* de ces vecteurs. Ce faisant, nous regardons la statique comme le cas particulier de la dynamique où la résultante de toutes les forces agissant sur un corps est nulle, laissant ce corps immobile (en *état d'équilibre*).

Limitons-nous à une manière simple et classique de considérer une force : celle d'employer un dynamomètre à ressort. L'allongement d'un ressort est l'effet d'une force (éventuellement résultante de plusieurs forces). Cette force est donc mesurable par cet allongement qui peut être étalonné (le long d'une règle graduée par exemple) à l'aide d'une force-étalon.

Servons-nous immédiatement de cet instrument pour aborder la notion de *poids* d'un corps, qui nous conduira à celle de *masse* (capitale dans la suite). Le poids d'un corps étant la force verticale exercée sur lui par l'attraction terrestre, un dynamomètre peut donc le mesurer.

Considérons deux corps de poids égal en un lieu donné et rendons-nous, avec notre dynamomètre, au pôle Nord puis sur l'équateur. Nous constatons que les poids des deux corps restent égaux mais n'ont pas la même valeur selon qu'ils se trouvent au pôle ou à l'équateur (supérieurs au pôle, plus proche du centre

de la Terre et où ne s'exerce pas de force centrifuge due à sa rotation sur elle-même).

Considérons par ailleurs deux corps de poids différents en un même endroit et notons le rapport de ces poids. Les mêmes voyages nous révèlent que ce rapport reste constant.

La propriété d'un corps de *peser* a été logiquement attribuée à la *quantité de matière* qu'il contient, dite *masse* du corps. Cette manière de pressentir la masse d'un corps par sa pesanteur s'est imposée en dehors de tout mouvement du corps (notamment celui de sa chute). Nous venons de voir que le poids s'apprécie précisément au moment où plus rien ne bouge (position d'équilibre d'un dynamomètre ou de tout autre instrument de type balance).

Ce n'est donc pas le poids d'un corps qui peut seul nous conduire à définir sa masse comme propriété intrinsèque, ne dépendant strictement que de lui (et donc ne dépendant pas du lieu où il se trouve). Par contre, *l'invariance* du rapport des poids de deux corps incite à exploiter ce rapport pour définir leur masse.

Soient deux corps de poids P_1 et P_2 en un certain endroit et de poids P_1' et P_2' en un autre endroit. On pose *par définition* que ce rapport constant est celui de leurs masses m_1 et m_2 :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1'}{P_2'} = \lambda \text{ (constante)}$$

Si l'on choisit un corps-étalon C_0 dont on prend la masse m_0 comme unité de mesure ($m_0 = 1$), on peut mesurer la masse m de tout corps C , car, en n'importe quel lieu on a :

$$\frac{\text{Poids } P \text{ du corps } C}{\text{Poids } P_0 \text{ du corps } C_0} = \lambda = \frac{m}{m_0}, \text{ soit } m = \lambda.$$

En un lieu donné, $\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}$ entraîne $\frac{P_1}{m_1} = \frac{P_2}{m_2} = g$ (constante),

où P_1 et P_2 dépendent de ce lieu, ce qui signifie, en généralisant, *qu'en un lieu donné* le rapport Poids/Masse de tous les corps est *invariable*. Cette invariance se traduit souvent par la formule bien connue sous cette autre forme : $P = mg$.

Mais la constante g (dite *intensité du champ de pesanteur* ou *de gravitation*) est, elle, *dépendante du lieu*.

*

La méthode scientifique moderne initiée par Galilée a conduit à une autre manière de définir la masse d'un corps : non par sa pesanteur mais par son *inertie*.

Rendons-nous sur un chantier où nous pouvons disposer de wagonnets circulant sur des rails horizontaux, et faisons abstraction des frottements mécaniques et de la résistance de l'air (précisions apportées en l'honneur de notre première expérience "idéalisée", ce dont nous nous dispenserons par la suite, comme convenu). Les wagonnets sont ainsi libérés de leur pesanteur dans leurs déplacements. Ils offrent néanmoins une résistance à nos forces lorsque nous voulons les mettre en mouvement, ou lorsque, une fois lancés, nous voulons les arrêter.

La masse d'un corps se manifeste ici par son *inertie* qui consiste en cette résistance "dynamique" liée au *mouvement* du corps, à l'inverse de la définition précédente.

(Nous avons utilisé les mots "statique" et "dynamique" pour comprendre ces deux concepts de masse. Il convient dorénavant d'emprunter la terminologie généralement employée, soit *masse pesante* et *masse inerte*).

C'est dans l'inertie des corps que réside le fondement de toute la dynamique classique, puisque celle-ci repose précisément sur le **principe d'inertie**, en vertu duquel :

"Un corps isolé sur lequel n'agit aucune force est soit animé d'un mouvement rectiligne uniforme, soit au repos" (première loi de Newton, qui mérite un détour historico-philosophique en *Annexe 1*).

Il s'en déduit que la seule manière de savoir qu'une force agit sur un corps est de constater une *variation de sa vitesse* (et non sa vitesse elle-même).¹

En d'autres termes : le vecteur vitesse n'est plus constant et, mathématiquement, sa dérivée par rapport au temps n'est plus nulle. C'est par son **accélération** (qui est cette dérivée) qu'un corps révèle qu'une force s'exerce sur lui (l'*Annexe 2* rappelle les

¹ Abstraction faite des actions déformatrices...

principales notions de cinématique auxquelles nous aurons souvent recours).

Mais Newton a posé en autre fondement, empruntant le concept de *masse inerte*, sa célèbre deuxième loi :

$$F = m\gamma.$$

Cette formule traduit le résultat d'une démarche qu'il nous faut approfondir.

L'expérimentation (que nous pourrions effectuer en manœuvrant nos wagonnets) a prouvé que l'application des forces $F_1, F_2, \dots$ sur un corps lui impriment des accélérations $\gamma_1, \gamma_2, \dots$, telles que $F_1/\gamma_1 = F_2/\gamma_2 = \dots = k$, *constante qui dépend du corps* (lequel ne se manifeste que par son inertie).

Cela conduit donc, avec la même logique que précédemment, à définir la *masse inerte* par ce rapport (d'où l'écriture également bien connue $F = m\gamma$).

*

On comprend maintenant que *la chute des corps* est un phénomène naturel d'un immense intérêt, puisqu'il s'agit du comportement des corps mis *en mouvement* par la force de *pesanteur*, ce qui met en jeu en même temps nos deux concepts de masse !

La loi de la chute des corps dans le vide, établie par Galilée, est l'un des premiers exemples éclatants d'application de la méthode scientifique moderne, s'exprimant en termes mathématiques. En expérimentant avec des boules de divers poids sur des plans inclinés, cela permettant le ralentissement de l'effet de chute, Galilée a pu démontrer qu'il s'agissait d'un mouvement *uniformément accéléré* (Annexe 2). Dans son expression la plus simple, celle où le corps est "lâché" à l'instant zéro, elle s'écrit : $d = \frac{1}{2} \gamma t^2$, où d est la distance parcourue au bout du temps t , et γ l'accélération *constante* du mouvement.

On voit que la masse ne figure pas dans l'expression. La distance parcourue, à tout instant, est *indépendante du corps*. Tous les corps tombent à la même vitesse, *dans le vide* répétons-le. Galilée l'a expérimenté et tous les lycéens connaissent le tube de Newton. Le seul fait de la variation de vitesse, qui ne peut ici échapper à nos sens, nous met en présence de $F = m\gamma$, la force étant l'attraction terrestre mettant en mouvement un corps en

s'adressant à sa masse *inerte*. Nous savons mesurer cette force à l'aide de notre dynamomètre. Elle vaut : $P = mg$, m étant la masse *pesante* et g l'intensité du champ de pesanteur (constante dépendant du lieu de l'expérience). Ainsi :

$$(\text{masse inerte}) \times \gamma = (\text{masse pesante}) \times g, \text{ d'où :}$$

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{\text{masse pesante}}{\text{masse inerte}}, \text{ expression dans laquelle :}$$

- l'accélération γ est la même pour tous les corps, donc indépendante du corps,
- la constante g ne dépend que du lieu, donc indépendante du corps.

Cela signifie que le rapport *masse pesante / masse inerte* est indépendant du corps, et que sa valeur dépend seulement des unités de mesure choisies. On peut les choisir de manière à ce que ce rapport soit égal à 1 (cf. *Annexe 3*)¹, de sorte que :

$$\text{masse pesante} = \text{masse inerte}.$$

Dans ces conditions, nous n'avons plus à faire de distinction entre ces deux masses, et nous avons :

$$\text{accélération } \gamma = \text{intensité du champ de pesanteur } g.^2$$

Un raisonnement par l'absurde peut encore mieux nous en convaincre. Supposons *les deux masses différentes* et retenons les deux expressions :

$$(a) : P = (\text{masse pesante}) \times g$$

$$(b) : F = (\text{masse inerte}) \times \lambda$$

Si dans (a) nous faisons croître la *masse pesante*, nous faisons croître la force P . Cela entraîne que dans (b), où la *masse inerte* est constante, cette croissance de force provoque celle de l'accélération. Autrement dit : *l'accélération d'un corps en chute libre croît proportionnellement à sa masse pesante*.

Si dans (b), où la force est constante (poids du corps lié à la *masse pesante*), nous faisons croître la *masse inerte*, cette croissance provoque la décroissance de l'accélération. Autrement

¹ L'Annexe 3, abordant cette question des unités, plus délicate qu'il n'y paraît, est très importante, car les unités sont la "soudure" entre les expressions mathématiques (purements abstraites) et les objets *réels* qu'elles traitent.

² Ce qui explique le joyeux mélange délibéré que l'on observe souvent entre l'accélération et la constante g , à commencer par l'écriture courante $d = \frac{1}{2} gt^2$.

dit : *l'accélération d'un corps en chute libre décroît proportionnellement à sa masse inerte.*

Nous ne pouvons sortir de ce paradoxe qu'en concluant que les deux masses sont identiques et que l'accélération est constante...

Enfin, l'expérience de pensée suivante, due à Galilée, clôt ce débat. C'est la loi d'Aristote elle-même qui prouve qu'elle est fausse ! Prenons une grosse boule en bois et une petite balle en mousse. Pour Aristote la boule tombe plus vite que la balle. Imaginons les deux corps reliés par un fil et laissons tomber le système qu'ils forment. La balle, plus lente, va "freiner" la boule, et la boule, plus rapide, va accélérer la balle. Le système doit donc tomber plus vite que la balle toute seule et moins vite que la boule toute seule, alors que le poids total est supérieur à celui de la boule et que l'ensemble devrait tomber encore plus vite que la boule toute seule.

Nous pouvons nous réjouir de ce résultat qui simplifie considérablement la théorie (qui aurait eu à gérer deux masses pour un corps), et surtout nos calculs.

Et pourtant...

Et pourtant il a fallu trois siècles (de Galilée à Einstein) pour s'apercevoir de quelque chose.

Mais n'anticipons pas, et continuons à suivre les pas de Galilée et Newton.

*

Lorsque nous observons les oscillations d'un pendule, nous nous convainquons facilement que, dans le vide et abstraction faite des très faibles résistances mécaniques subsistantes, ce mouvement serait quasi-perpétuel.

Soit un pendule au repos, formé d'un corps C suspendu à un fil fixé au point O (*FIG. 1*). Ecartons-le de sa position d'équilibre C_0 pour l'amener à la position C_1 , ce qui représente de notre part une certaine dépense d'énergie E_p . Nous le lâchons. Il se met en mouvement avec une vitesse croissante jusqu'à C_0 , puis décroissante jusqu'à C_2 — position symétrique de C_1 par rapport à OC_0 —, d'où il revient de la même manière en C_1 .

Nous le rattrapons à cet instant, de sorte que nous nous retrouvons comme si nous ne l'avions jamais lâché. Dans l'intervalle, un corps matériel a donc voyagé "gratuitement" (sans dépense d'énergie) ! Que s'est-il passé ?

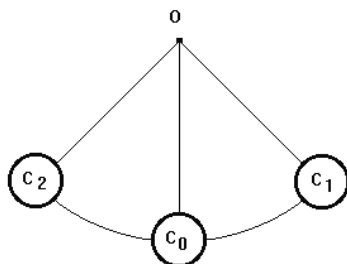


FIG. 1

Le corps est constamment soumis à la force de pesanteur. Mais il ne peut démarrer tout seul de sa position d'équilibre C_0 où nous l'avons trouvé. Il faut pour cela le déplacer. En C_1 il possède cette capacité de démarrer si nous le lâchons. Il a donc emmagasiné notre énergie E_p dépensée pour l'y placer. E_p est l'énergie *potentielle* qu'il possède en vertu de sa *position*.¹

On comprend qu'il puisse regagner sa position de repos en dépensant cette énergie. Mais il ne se contente pas de cela.

En C_0 il est animé d'une vitesse maximale capable de lui faire atteindre la position C_2 où sa vitesse s'annule. Nous constatons donc qu'en C_0 le corps possède une énergie E_c égale à celle qui l'a placé en C_1 . E_c est l'énergie *cinétique* qu'il possède en vertu de sa *vitesse*.

En changeant le corps de place, nous avons travaillé *contre la pesanteur*. Ce travail donne au corps la faculté de réaliser un travail égal *avec la pesanteur*. L'acquisition de sa vitesse grâce à la pesanteur est l'effet de son énergie potentielle. Le travail qu'il exerce lui-même grâce à cette vitesse (son déplacement de C_0 à C_2) est l'effet de son énergie cinétique.

¹ Il s'agit de *position* dans cet exemple. Nous pourrions raisonner de manière analogue en observant le mouvement "en accordéon" d'un ressort que nous aurions étiré, l'énergie potentielle dépendant alors de sa forme. Encore plus généralement, c'est de l'état du système qu'il s'agit.

Aux positions C_1 et C_2 , l'énergie potentielle est maximum et l'énergie cinétique est nulle (vitesse nulle). En C_0 , l'énergie potentielle est nulle (elle ne peut plus faire croître la vitesse qui a atteint son maximum) et l'énergie cinétique est maximum (vitesse maximum). Au fur et à mesure que le corps descend son énergie potentielle diminue jusqu'à devenir nulle et son énergie cinétique augmente. Inversement, au fur et à mesure qu'il monte, son énergie potentielle augmente et son énergie cinétique diminue. Ces deux énergies se compensent donc constamment, de sorte que, à tout instant :

la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique reste constante ; cette somme est l'énergie mécanique du système.

L'Annexe 4 rappelle et traite sommairement les résultats de la dynamique qui nous intéressent.

*

Comment décrit-on un mouvement ?

Un voyageur arrive à la gare à minuit, un quart d'heure avant le départ de son train. Il s'installe confortablement dans son compartiment, tire les rideaux, coiffe son casque de "baladeur" et s'arme de patience. Rien ne bouge : il est immobile, ses bagages sont immobiles, le train est immobile. Il est seul et il s'endort, en musique. Il se réveille, toujours seul, et se demande combien de temps a-t-il dormi. Il regarde sa montre : elle s'est malencontreusement arrêtée à minuit cinq. Il se pose la question que l'on devine : le train est-il parti ? Tout est immobile, y compris les rideaux qui pendent bien verticalement, sans aucune oscillation. Il se lève, emprunte le couloir et se dirige vers un autre voyageur pour lui demander l'heure. Il est une heure.

Ce n'est qu'à ce moment qu'il peut savoir que lui, ses bagages, les rideaux, le train, se déplacent à grande vitesse d'un mouvement rectiligne et uniforme.

Rien ne bouge et tout bouge. Nous savons qu'il n'y a pas de mystère. De nuit, le voyageur ne peut se *repérer* que *par rapport au train*. Dans ce *système de référence*, ses bagages et les rideaux sont parfaitement immobiles, et lui-même s'est déplacé à environ 2 km/h dans le couloir.

Le chef de la petite gare que le train traverse à 200 km/h évalue cet événement par rapport au quai. Dans son système de