Énoncés opératoires des lois de Newton

Pour ceux qui ne voudraient pas s'investir dans la lecture de mon ouvrage « *La démarche expérimentale ? Mais c'est très simple !* », j'isole ici les énoncés des lois du mouvement que je propose. L'exposé est plus complet que ce qu'on peut trouver dans les annexes ou dans le livre d'exercices[1].

Rappels

La mécanique classique décrit généralement avec une bonne approximation[2] les mouvements d'objets :

- dont la vitesse est faible par rapport à celle de la lumière ;
- dont les dimensions sont supérieures ou égales à celles d'un atome.

Ces deux restrictions ne délimitent pas complètement le champ de validité des énoncés qui par nature ne peut pas l'être de façon exhaustive. Il s'agit seulement d'attirer l'attention sur le fait que les lois de la mécanique classique ne sont pas universelles.

Telles qu'elles sont énoncées, nous ne pouvons appliquer les lois de Newton qu'à des objets ponctuels[3]. Or la plupart des problèmes concernent des objets étendus. Pour pouvoir les réduire à des points, Newton a formulé des hypothèses fortes :

- Les objets étendus peuvent se décrire par une somme de points matériels[4] ;
- Les actions de gravitation sont la somme des interactions entre ces points matériels (principe de superposition : la présence d'autres corps ne modifie pas l'interaction gravitationnelle entre deux points matériels ou même entre deux corps quelconques s'ils ne se déforment pas).

Newton a aussi conjecturé, puis démontré qu'une couche sphérique de masse homogène créait :

- sur des objets extérieurs quelconques, une force de gravitation identique à celle créée par un point nanti de la masse totale de l'objet[5] ;
- et sur des objets intérieurs, une force nulle.

---

[1] Voir :**http://www.courville.org/mediawiki/index.php/Brenasin**

[2] C'est-à-dire supérieure à celle de toutes les mesures de dimensions macroscopiques.

[3] Par exemple dans l'expression de la loi de la gravitation $\vec{F} = G\dfrac{Mm}{r^2}\vec{u}_r$, r désigne la distance entre deux points.

[4] Un passage à la limite permet de transformer un nombre fini de points matériels de masses finies en une distribution continue.

[5] Et en conséquence des champs et des potentiels.

Il est possible de démontrer que le mouvement du centre d'inertie d'un corps est celui d'un point matériel de masse égale à la masse totale de l'objet soumis à la somme (vectorielle) des forces qu'exercent les objets extérieurs[6] sur lui.

Commençons par la **loi des actions réciproques** dite aussi **loi de l'action et de la réaction**, dite encore **troisième loi de Newton**[7]. Nous en aurons besoin pour introduire la loi fondamentale de la dynamique, dite deuxième loi de Newton.

Ainsi de nombreux problèmes peuvent être résolus en représentant un objet étendu par un « point matériel » situé au centre de gravité de l'objet et nanti d'une caractéristique : sa masse. Le modèle de « point matériel » a l'avantage de définir la position de l'objet avec une précision « mathématique ». La loi des actions réciproque justifie la représentation des objets par un « point matériel » ; notons que le mouvement complet de l'objet peut être séparé en un mouvement du centre d'inertie et un mouvement de rotation autour de ce dernier, ces deux mouvements étant indépendants l'un de l'autre.

Énoncé opératoire de la troisième loi ou axiome[8] de Newton ou « principe des actions réciproques »

Notons enfin que la loi des actions réciproques ne s'applique pas en électromagnétisme. Elle s'applique seulement aux charges immobiles ou de vitesse suffisamment faible pour qu'on puisse négliger le champ magnétique qu'elles créent.

Si un objet A exerce sur un objet B une force $\vec{F}_{A/B}$[9], alors B exerce sur A une force $\vec{F}_{B/A}$ telle que : $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$ et ceci même si les objets se déplacent.

L'expression de cette loi montre bien que, lorsqu'on cite une force $\vec{F}$ sans plus de précision, personne ne peut savoir s'il s'agit de $\vec{F}_{A/B}$ ou de $\vec{F}_{B/A}$. C'est pourquoi, quitte à alourdir l'écriture, je noterai toujours en indice le symbole des objets entre lesquels s'exerce la force prise en compte.

Le principe de « l'action et de la réaction » entraîne que la somme des forces que les éléments de masse intérieurs à l'objet exercent les uns sur les autres est nulle.

Énoncé opératoire de la deuxième loi de Newton ou loi fondamentale de la dynamique

---

[6] Toutes les précisions précédentes sont dues à Claude Marti.

[7] Notons que ces dénominations multiples ne sont pas faites pour simplifier l'apprentiddage. La tradition qui consiste à numéroter les lois de newton, ne permet pas de savoir à quoi elles se réfèrent si on ne les utilise pas souvent. Je préfère la première expression qui est plus proche du sens de la loi.

[8] Selon l'expression de Newton, nous disons traditionnellement principe ; or, contrairement aux lois les principes ont un champ d'application qui ne connait pas de limite. Pourquoi ne pas leur accoler le qualificatif « d'universel ».

[9] Qui s'énonce : force de A sur B.

Dans un repère galiléen $\mathcal{R}$, la somme des forces que les objets extérieurs à B (objet immuable assimilable à un point) exercent sur B est égale au produit de la masse de B par l'accélération de B.

$$\sum \vec{F}_{Oext/B} = m_B \vec{a}_B$$

En particulier lorsque $\sum \vec{F}_{Oext/B} = 0$, l'objet B est immobile ou bien sa vitesse est constante[10].

Réciproquement : dans un référentiel galiléen $\mathcal{R}$, lorsque B est immobile ou se déplace avec une vitesse constante, alors les objets qui lui sont extérieurs exercent sur lui une force totale nulle :

$$\sum \vec{F}_{Oext/B} = 0.$$

Comment reconnaît-on un référentiel galiléen ?

Un référentiel galiléen est, par définition, un référentiel $\mathcal{R}$ dans lequel le principe d'inertie s'applique. C'est-à-dire que :

Si on observe qu'un objet[11] se déplace avec une vitesse constante ou nulle, et si on sait que les objets qui lui sont extérieurs exercent sur lui une force totale nulle, alors il se meut dans un référentiel galiléen, c'est-à-dire que son mouvement est rectiligne et sa vitesse constante.

Procédure d'utilisation de la loi fondamentale de la dynamique :

Comment procéder pour utiliser la loi fondamentale de la dynamique ?

Dans les situations qui permettent de représenter l'objet B par un point matériel il faut :

- Sélectionner par la pensée l'objet B dont on veut connaître le mouvement. B est représenté par un point, caractérisé par une masse m_B et une accélération $\vec{a}_B(t)$[12].

Répertorier tous les objets qui sont à l'extérieur de B et qui exercent une force « notable » sur B. Ils forment le système S'. Il faut donc absolument connaître les ordres de grandeur des différentes interactions[13] pour modéliser la situation et résoudre le problème.

---

[10] On dit généralement en langage stéréotypé « est animé d'un mouvement rectiligne uniforme ». Or « animé » se dit « des personnes et des animaux qui bougent » spécifie le Robert. Concernant des objets inanimés l'expression est donc impropre… malgré la poétique question de Lamartine : « objets inanimés avez-vous donc une âme… ? »

[11] Claude Marti me fait justement remarquer qu'en toute rigueur il faudrait constater que deux objets ont une vitesse constante ou nulle dans deux directions différentes ; en effet un mouvement peut être rectiligne uniforme dans une direction sans que le référentiel qui lui est attaché soit forcément galiléen : par exemple. s'il tourne en ayant la direction du mouvement pour axe de rotation.

[12] L'accélération est éventuellement variable au cours du temps d'où la notation a(t) qui se lit : fonction du temps **t**.

Étant bien entendu qu'il s'agit de choisir le référentiel lié aux objets étudiés et le plus apte à simplifier la résolution du problème posé.

Selon la question posée, le choix des éléments qu'il faut attribuer au système diffère selon qu'il est plus judicieux d'utiliser les lois de Newton, par exemple pour décrire des trajectoires, ou le principe de la conservation de l'énergie lorsqu'il s'agit de calculer des vitesses par exemple.

Le travail :

Par définition : **la fonction** du travail est de traduire une forme de transfert d'énergie d'un système à un autre.

La définition formelle ne permet pas d'attribuer au travail les propriétés suivantes :

- La grandeur physique « travail » décrit le transfert d'énergie d'un système S' à un autre système S.
- Les états d'énergie de chacun des systèmes qui échangent du travail varient.
- Entre l'état initial et l'état final, le travail transféré d'un système à un autre dépend de la transformation[14] envisagée.

Définition du travail élémentaire

Par définition : le travail qu'un système extérieur S' fournit algébriquement à un système S pour déplacer un de ses éléments B, qui se situe initialement au point M, se calcule à l'aide de la relation :

$$(1)\ \delta W = \vec{F}_{S'/B}\left(M\right) d\vec{M}$$

Où $\vec{F}_{S'/B}(M)$ désigne la force que le système S', exerce sur l'élément B appartenant à S pendant qu'il se déplace de $d\vec{M}$.

Il en découle les propriétés suivantes :

- δW est une grandeur algébrique (signe du produit scalaire).
- Le travail traduit un transfert ordonné d'énergie[15] ;
- Le travail peut se transformer en travail ou en chaleur.
- Il est égal à l'énergie « fournie algébriquement », par le système extérieur S' au système S qui sert de référence, c'est-à-dire que si $\delta W > 0$ le système S reçoit du travail et son énergie augmente d'autant, dans le cas contraire il fournit le travail et son énergie diminue d'autant.

Définition opératoire de l'énergie potentielle

---

[13] Dans le cas des objets étendus et dans celui des mouvements comportant des rotations il faut parfois envisager des sommations.

[14] Étant bien entendu que la transformation comprend la description de la façon de passer d'un état à un autre.

[15] Contrairement au transfert de chaleur qui est une forme d'énergie désordonné.

Pour le moment[16] :

Nous qualifierons de *potentielle* toute variation d'énergie $\Delta E = \Delta E_p$ associée à un pur changement de *position* des objets M_i constituant le système S. Dans une transformation où il n'y a de changement ni de vitesse ni de structure interne[17], la variation d'énergie du système se confond avec sa variation d'énergie potentielle qui se calcule de la façon suivante :

La variation d'énergie potentielle ΔE_p du système S, entre un état initial *1* et un état final *2*, est égale alors au travail « *quasistatique* » et réversible[18] qu'un système extérieur S' doit lui fournir pour le faire passer d'un état à l'autre en agissant par exemple sur un des éléments B appartenant à S. Donc :

$$1)\ \Delta E_p = E_p(2) - E_p(1) = W = \int_1^2 \vec{F}_{S'/B}(M)\, d\vec{M}$$

Énoncé opératoire du principe universel de la conservation de l'énergie

L'énergie totale d'un système isolé est constante.

Ceci n'est praticable qu'à partir du moment où nous avons constitué un système isolé dont nous savons calculer l'énergie.

Procédure d'utilisation :

Pour pouvoir utiliser le principe universel de conservation de l'énergie, il est impératif ;

- De construire le système isolé S pris en compte. Il faut donc répertorier les objets qui en font partie. Pour y parvenir, il faut connaître les ordres de grandeur des différentes interactions en présence ;
- De préciser un état du système considéré comme initial. Cela peut être, par exemple, celui qui correspond au moment où la contrainte extérieure qui le maintenait en équilibre est relâchée ;
- De préciser certaines caractéristiques d'un deuxième état considéré comme final du système afin de pouvoir le déterminer.

Pour qu'un étudiant puisse utiliser le principe de conservation de l'énergie, il doit disposer des informations qui lui permettent d'effectuer les opérations décrites ci-dessus. Cette remarque serait très banale si les auteurs n'omettaient pas de les indiquer dans de nombreux textes d'exercices. C'est le cas lorsqu'ils décrivent les situations en termes de grandeurs physiques par exemple des masses se déplaçant dans le champ de pesanteur ou des charges dans des champs magnétiques constants. Dans ce cas particulier, il devient particulièrement difficile de constituer des systèmes isolés, car il faut tenir compte des apports

[16] Voir *La démarche expérimentale.*

[17] Par exemple les objets ne se brisent pas.

[18] Autrement dit la température des objets n'est pas modifiée ; il n'y a pas de frottement entre les objets donc pas d'échange de chaleur.

d'énergie permettant d'assurer que le champ magnétique est constant[19]. Il s'ensuit que lorsqu'on divise le monde en systèmes, il faut s'assurer que les variations du système de référence n'affectent pas le système considéré comme extérieur. C'est d'autant plus difficile qu'il s'agit parfois d'ordres de grandeur totalement négligeables.

Dans le cas particulier où le système S ne comporte que deux objets A et B, l'énergie totale de S comporte l'énergie potentielle du système A-B et l'énergie cinétique de chacun des constituants. Pour décrire l'évolution de systèmes complexes, il faut tenir compte de toutes les formes d'énergie qui interviennent dans la situation. Les Anglo-saxons dont l'enseignement est infiniment plus pragmatique que le nôtre ne sont pas forcément plus clairs que nous. Alonso et Finn parlent de la conservation de l'énergie totale d'une particule en lui attribuant une énergie potentielle[20]-[21].

Il n'existe qu'une façon de calculer l'énergie potentielle à partir des forces, mais elle peut prendre plusieurs formes mathématiques selon qu'au moins un des objets a une très grande masse, ou qu'ils sont chargés électriquement ou qu'ils sont complexes, l'énergie potentielle est alors qualifiée de : gravitationnelle, électrique, élastique, etc. Par ailleurs, il existe encore un grand nombre d'autres sortes d'énergie qui sont examinées dans les cours au fur et à mesure des besoins. Pour en savoir plus au sujet de l'énergie, il est éclairant de lire ce qu'en écrit Feynman dans son cours de mécanique[22].

---

[19] Des collègues m'ont signalé que même des chercheurs faisaient parfois des erreurs ayant, entre autres, pour origine cette méconnaissance !

[20] Marcelo Alonso, Edward J. Finn. *Physics.* Addisson-Wesley. 1992. p. 174. Ils suivent une démarche traditionnelle qui utilise le concept de force conservative que j'évite parce qu'il fait appel à des propriétés mathématiques difficiles à relier à celles des systèmes matériels.

[21] J'insère ici un commentaire de Claude Marti qui défend ce langage : Soit nous disons cela parce que le système créateur de champ n'est que peu affecté (la Terre ne bouge guère quand je tombe et le champ n'est guère affecté, ma chute non plus) ; soit je dis que la fonction thermo pertinente est une enthalpie généralisée, supposant l'existence non pas d'un thermostat ou d'un pressostat, mais d'un « potentiostat ». La question est évidemment d'estimer la réaction de la source du champ.

[22] R. Feynman, *Le cours de physique, Mécanique 1.* InterEdition. 1986. Chapitre 4, p. 42.