

Le principe des actions réciproques

par A. GIBAUD et M. HENRY

Préparation au CAPES de Sciences Physiques

Université du Maine - Faculté des Sciences - 72017 Le Mans Cedex

Qui n'a pas un jour pesté contre sa satanée voiture qui ne démarrait pas par un froid matin d'hiver. La traîtresse de batterie est sans doute un peu faible et il suffira probablement de pousser la voiture pour la mettre en marche. Cette histoire banale est à la base d'un casse-tête pédagogique pour le professeur de première S. En effet, celui-ci ne possédant pas de batterie de rechange pousse comme tout un chacun son véhicule et décide de faire analyser la mise en mouvement de la voiture par ses élèves. Il explique alors en utilisant le principe des actions compensées qu'au point de contact sa force de poussée sur la voiture est compensée par la force de réaction de la voiture (figure 1). Fatigué d'avoir poussé son véhicule, il affronte alors la question qui l'achève : mais pourquoi le véhicule avance-t-il donc si les actions de contact se compensent ?

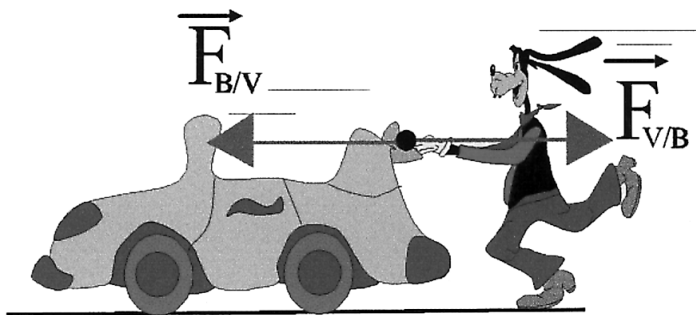


Figure 1 : La force du bonhomme sur la voiture est compensée par la réaction de la voiture sur le bonhomme indépendamment de la nature du mouvement de la voiture.

Le principe de l'action et de la réaction encore appelé principe des actions réciproques vient d'être introduit dans le nouveau programme de la classe de première S. Il figure dans les tous premiers chapitres du cours de mécanique de la classe de première. Ce principe, à l'origine

connu sous le nom de troisième loi de Newton, peut s'énoncer de la façon suivante :

«Lorsque deux systèmes S_1 et S_2 sont en interaction, quel que soit le référentiel d'étude et quel que soit le mouvement (ou l'absence de mouvement) d'un système, l'action du système S_1 sur le système S_2 est compensée par la réaction du système S_2 sur le système S_1 ».

Ce principe, qui s'applique merveilleusement bien aux actions à distance comme l'interaction gravitationnelle ou l'interaction Coulombienne, prévaut également dans le cas des interactions de contact. Alors que son application ne pose pas de difficulté sérieuse quand les systèmes sont au repos, il en va tout autrement quand il y a mouvement et contact. On voit apparaître alors d'apparentes contradictions qui naissent d'un raisonnement intuitif. Ce problème déjà soulevé par L. VIENNOT [1] en 1983 qui prenait l'exemple de la valise placée dans un filet à bagages nous a semblé suffisamment d'actualité pour que nous en proposons une approche détaillée dans le cas de diverses actions de contact. Nous présentons dans ce qui suit le cas de la valise de L. VIENNOT [1], le cas de la luge proposé dans un manuel de première S [2] et le cas d'une personne située sur un pèse-personne dans un ascenseur.

1. INTERACTIONS DE CONTACT MAIN-VALISE

Nous considérons une valise portée par un passager. Ce dernier, après être entré dans un compartiment au repos souhaite monter sa valise dans le filet à bagages. Le problème que nous souhaitons aborder est l'évaluation des actions de contact main-valise au cours du trajet de la valise. Nous partons de la situation d'équilibre où la valise est au repos (figure 2). La valise étant au repos, on peut aisément faire passer l'idée que l'action de la valise sur la main soit compensée par la réaction de la main sur la valise soit :

$$\vec{F}_{V/M} + \vec{F}_{M/V} = \vec{0} \quad (1)$$

En effet, intuitivement, cette démarche est mentalement associée à la traduction de l'équilibre du système valise :

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0} \quad (2)$$

dont le poids $\vec{P}$ associé à l'action de la valise sur la main est compensé par l'action de la main sur la valise, la main empêchant la valise de tomber sous l'action de son poids. Il importe pourtant de signaler que

traduire l'équilibre du système valise suppose que l'on se limite implicitement à un système unique et que tout ce qui n'est pas la valise est extérieur au système.

De la situation de repos, le passager cherche à mettre la valise dans le filet et de ce fait modifie sa vitesse en imprimant à la valise une force supérieure à son poids. C'est alors que les choses se gâtent car s'il est vrai que pour faire passer la valise de l'état de repos à une vitesse non nulle, il faut que les forces sur la valise soient non compensées, il en va tout autrement des actions de contact entre la main et la valise qui, elles, restent compensées. Toute la difficulté provient, *primo*, de la définition des systèmes mis en jeu et *secundo*, du raisonnement intuitif qui consiste à mentalement associer la force de la valise sur la main au poids de la valise. Il est clair que c'est surtout sur ce deuxième point qu'il faut insister. Aborder ce sujet avec des élèves de première qui ne disposent pas du principe fondamental de la dynamique est donc une chose délicate et le professeur devra, inévitablement, s'attendre à la question posée par quelques élèves méfiants à l'égard du principe des actions compensées : mais que vaut donc cette force ?!!! Ce sera alors peut-être une bonne occasion de les mettre en garde contre les raisonnements intuitifs.

La solution à ce problème consiste à admettre le principe des actions compensées en précisant qu'il s'applique à l'interaction entre deux systèmes qui sont le système main et le système valise et à raisonner simultanément sur le système valise. Nous noterons à ce sujet qu'un principe s'admet et que sa validité ne tient que s'il n'est jamais mis en défaut. C'est notamment le cas pour les trois principes de Newton à savoir le principe d'inertie, le principe fondamental de la dynamique et le principe des actions compensées.

Le principe des actions compensées stipule donc que dans la phase d'accélération de la valise :

$$\vec{F}_{V/M} + \vec{F}_{M/V} = \vec{0} \quad (3)$$

Simultanément, le système valise considéré dans le référentiel train au repos (considéré comme galiléen) est soumis à deux forces extérieures qui sont le poids $\vec{P}$ de la valise et l'action de la main sur la valise $\vec{F}_{M/V}$. L'application du principe fondamental de la dynamique conduit à :

$$\vec{P} + \vec{F}_{M/V} = m\vec{a}_{V/T} \quad (4)$$

La comparaison des deux équations 3 et 4 montre immédiatement que la force de la main sur la valise n'est plus égale au poids comme cela était le cas à l'équilibre mais à :

$$\vec{F}_{M/V} = m\vec{a}_{V/T} - \vec{P} = m(a_{V/T} + g) \vec{k} \quad (5)$$

ou $\vec{k}$ est un vecteur unitaire porté par l'axe des z vertical ascendant.

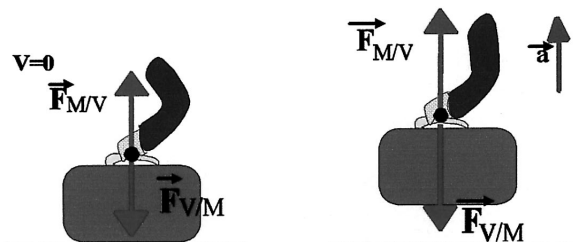


Figure 2a : Représentation des actions de contact entre la main et la valise dans les phases de repos et d'accélération de la valise.

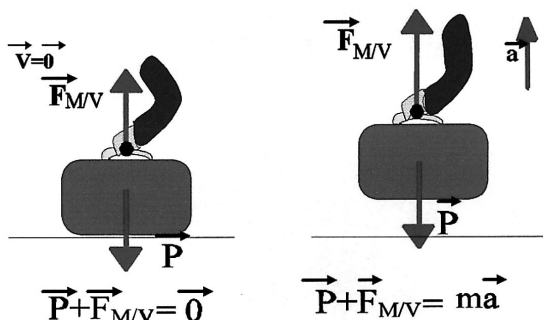


Figure 2b : Application du principe d'inertie au système valise dans les deux phases de repos et d'accélération.

Cette force est donc supérieure au poids de la valise (figure 2) mais reste compensée tout au cours du mouvement de la valise par l'action sur la main qui devient elle-même supérieure au poids de la valise. On peut noter avec intérêt que l'équation (3) est équivalente à la traduction de l'équilibre de la valise dans le référentiel en mouvement de la valise. En effet dans ce référentiel qui n'est plus galiléen la valise est au repos et la traduction de l'équilibre de la valise impose la prise en compte des forces d'inertie. Dans le référentiel valise nous avons donc le poids de la valise, la force de la main sur la valise et la force d'inertie d'entraînement $\vec{F}_{ie} = -m\vec{a}_e = -m\vec{a}_{V/T}$.

Il s'en suit que dans le référentiel non galiléen de la valise, la condition d'équilibre est donnée par :

$$\vec{P} + \vec{F}_{ie} + \vec{F}_{M/V} = \vec{P} - m\vec{a}_{V/T} + \vec{F}_{M/V} = \vec{0} \quad (6)$$

La comparaison des équations 3 et 6 montre bien que la force de la valise sur la main est donc :

$$\vec{F}_{V/M} = \vec{P} - m\vec{a}_{V/T} \quad (7)$$

Les équations 5 et 7 donnent les expressions des deux forces d'interaction dans toutes les phases du mouvement de la valise. Il est clair que ces forces d'interaction qui se compensent ont une intensité qui dépend du type de mouvement de la valise. La distinction des phases du mouvement fait apparaître trois cas possibles :

- mouvement rectiligne uniforme ou repos $\vec{F}_{V/M} = \vec{P}$,
- mouvement accéléré $\vec{F}_{V/M} > \vec{P}$,
- mouvement décéléré $\vec{F}_{V/M} < \vec{P}$.

Il est intéressant de commenter l'évolution de l'intensité de cette force. Pour communiquer une vitesse non nulle à la valise, le porteur doit évidemment fournir une force supérieure au poids de la valise qui était la force qui la maintenait en équilibre. Cela montre aussi qu'au cours de cet effort supplémentaire que fournit le porteur, celui-ci trouve que la valise devient plus lourde ce qui montre alors que l'action de la valise sur la main n'est pas ressentie par le porteur de la même façon si la valise est au repos ou en mouvement accéléré. Cette façon de présenter le problème permet de justifier que l'action de la valise sur la main n'est pas toujours égale au poids de la valise. Un exemple similaire est celui du culturisme qui, allongé sur un banc, cherche à soulever une barre lestée. Quiconque a tenté cette expérience sait pertinemment que le maintien de l'équilibre est une chose mais que de remonter la barre en est une autre : la barre semble s'alourdir quand il s'agit de la remonter.

2. MOUVEMENT D'UNE LUGE

Nous considérons tout d'abord la luge au repos. L'écriture simultanée du principe des actions réciproques et de l'équilibre du système luge conduit au fait que l'action du sol sur la luge est compensée par le poids de la luge. La force du sol sur la luge est associée à la réaction

du support et la force de la luge sur le sol au poids de la luge. Un raisonnement analogue peut être tenu si la luge est sur un plan incliné et reste en équilibre sous l'action des forces de frottements. Le principe de l'action et de la réaction n'est pas en contradiction avec la traduction de l'équilibre pour lequel le poids compense la somme de la réaction normale du support et de la force de frottement.

Évidemment une luge est faite pour glisser (figure 3) et c'est alors que les choses se compliquent car, tout pédagogue que l'on soit, il devient difficile de faire passer aux élèves que la luge se met à bouger avec des forces qui restent compensées, surtout si le but de la leçon est la présentation du principe des actions compensées où l'on se doit d'insister sur ce point. Il importe alors de dégager la notion de système. Faisant intervenir le fait que le principe de l'action et de la réaction est valable en considérant deux systèmes, le système luge et le système sol, on écrit qu'au point de contact l'équation 1 est vérifiée. Le mouvement de la luge peut lui s'expliquer en ne considérant que le système luge pour lequel le poids ne compense plus la réaction du support, tout du moins si la luge est en mouvement accéléré. C'est alors que vient la question piège : mais au fait quelle est la force de la luge sur le sol ? Il ne peut plus s'agir du poids puisqu'il ne compense plus la réaction du support. La réponse vient naturellement si nous disposons du principe fondamental de la dynamique. Elle est plus difficile à donner en classe de première S où ce genre de problème est abordé avec les élèves dès les premiers cours de mécanique.

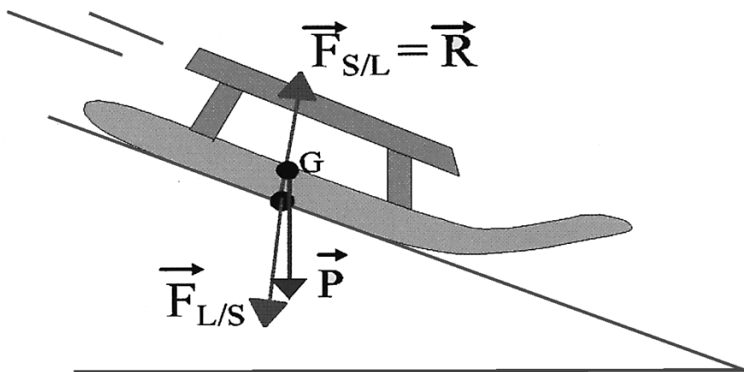


Figure 3 : Visualisation des actions compensées de contact sol-luge et luge-sol au cours du mouvement accéléré de la luge. Les forces agissant sur la luge ne sont pas, par contre, compensées.

Cette réponse peut être obtenue en considérant le principe fondamental de la dynamique et le principe de l'action et de la réaction. La force du sol sur la luge est appelée réaction du support $\vec{R}$ dans ces deux équations. On a ainsi :

$$\vec{P} + \vec{R} = m\vec{a} \quad (8a)$$

$$\vec{F}_{L/S} + \vec{R} = \vec{0} \quad (8b)$$

En reportant la valeur de $\vec{R}$ déduite de 8a dans 8b, il vient :

$$\vec{F}_{L/S} - \vec{P} + m\vec{a} = \vec{0} \quad (9)$$

ce qui donne la valeur de la force de la luge sur le sol. Cette équation n'est rien d'autre que la traduction de l'équilibre de la luge dans le référentiel non galiléen de la luge. Cette force dépend donc de la nature du mouvement de la luge sur le sol. Il est intéressant de noter le cas limite (peu réaliste il est vrai) où la luge serait à 90° de l'horizontale et où la force de la luge sur le sol devient alors nulle puisque $\vec{a} = \vec{g}$.

Il nous semble que dans ce cas, comme dans celui du véhicule en panne, le principe des actions réciproques soit plus difficile à faire accepter. Il vaudrait donc mieux les présenter après avoir abordé des situations plus simples comme celle de la valise ou encore le cas suivant : le pèse-personne dans un ascenseur.

3. PÈSE-PERSONNE DANS L'ASCENSEUR

Nous terminons cette note par l'étude d'une personne se trouvant dans un ascenseur (figure 4) en mouvement ascendant et qui décide de vérifier son action de contact avec le pèse-personne dans les différentes phases du mouvement de l'ascenseur.

L'étude est réalisée dans le référentiel non galiléen de l'ascenseur dans lequel la personne est au repos. Comme il s'agit d'un problème d'équilibre il est facile de faire dire aux élèves que l'action de l'individu sur le sol est compensée par la réaction du sol sur l'individu. L'action de la personne sur le pèse-personne est appelée $\vec{F}_{P/S}$ et l'action du pèse-personne sur la personne $\vec{F}_{S/P}$. L'intérêt de cet exemple réside dans sa simplicité et dans son côté pratique tant il est facile de le vérifier. De plus le pèse-personne agit comme un dynamomètre et donne à tout instant $\|\vec{F}_{P/S}\|$. Quand l'ascenseur est au repos, l'individu constate que son action sur le pèse-personne correspond à son poids

$\|\vec{P}\|$. L'ascenseur démarre et passe par une phase accélérée. L'individu constate alors que son action sur le sol croît : il semble plus lourd. Puis l'ascenseur prend un mouvement uniforme et l'individu retrouve son action sur le sol au repos c'est-à-dire son poids $\|\vec{P}\|$. L'ascenseur ralentit et l'individu observe que son action sur le sol diminue : il se sent alors moins lourd. Toutes ces observations peuvent être expliquées en appliquant le principe fondamental de la dynamique (deuxième loi de Newton) au système individu dans le référentiel de l'ascenseur soit :

$$\vec{F}_{S/P} + \vec{P} - m\vec{a}_{A/T} = \vec{0} \quad (10)$$

ce qui montre que :

$$\vec{F}_{P/S} = \vec{P} - m\vec{a}_{A/T} \quad (11)$$

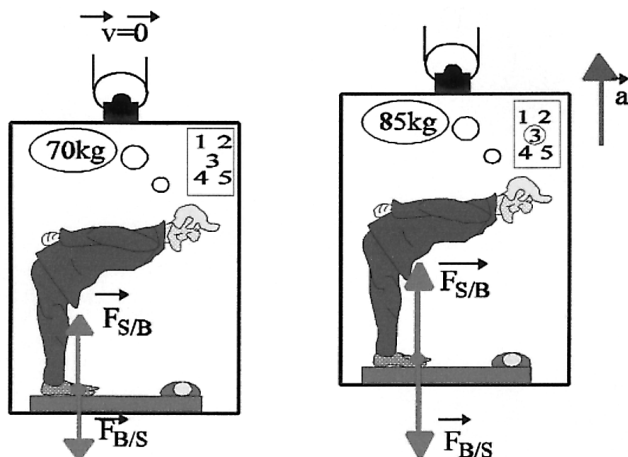


Figure 4 : Principe des actions compensées dans un ascenseur au repos ou en mouvement accéléré : la force du bonhomme sur le sol est toujours compensée par la réaction du sol sur le bonhomme.

Cette dernière relation permet de comprendre parfaitement l'évolution de l'action de contact entre l'individu et le sol. Il est ainsi possible de faire sentir aux élèves que, si la troisième loi de Newton est bien vérifiée quel que soit le type de mouvement, les forces d'interaction qui se compensent ont une intensité variable selon la nature du mouvement.

4. CONCLUSIONS

En conclusion, nous avons présenté dans cet article quelques exemples qui permettent d'appréhender le principe des actions compensées. Cette notion reste difficile à aborder dans sa généralité en classe de première S puisqu'il ne sera pas possible d'en justifier toutes les subtilités. Il semble cependant que cette démarche, présentée avec précaution, puisse éveiller la curiosité des élèves et, de ce fait, représente un intérêt pédagogique certain.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. VIENNOT, B.U.P. n° 640, p. 479.
- [2] *Physique première S*, Collection Galiléo Bordas.