

Dynamique

Introduction

Quelles sont les causes du mouvement ? Cette question l'homme de l'Antiquité se la posait déjà et la réponse qu'il apportait conditionnait sa vision du cosmos comme notre réponse actuelle conditionne la nôtre. Ainsi on ne peut aborder la dynamique sans montrer comment, à l'époque de Galilée, la vision du cosmos va changer radicalement sous l'influence de la nouvelle mécanique ébauchée par Galilée puis mise au point par Newton.

Banesh Hoffmann dans son livre "Histoire d'une grande idée, la relativité" situe le débat :

" La Terre est-elle en mouvement ? Les peuples de l'antiquité n'auraient pas hésité à répondre que c'était impossible. Ils se seraient demandé comment on osait poser une question pareille. Le guerrier blessé tombait sur la Terre, le cerf filait sur sa surface et l'aigle prenait son essor au dessus d'elle. Mais la Terre ne pouvait tomber sur elle même comme une feuille, ni effleurer sa propre surface comme le vent, ni prendre son essor comme le Soleil. Tout paraissait bouger.. pas la Terre.

Autour de la Terre, comme pour attester de son importance cosmique, brillait de mille clartés l'impressionnante voûte céleste, une sphère où les étoiles fixes scintillaient comme des pierres précieuses, une sphère qui tournait majestueusement, une fois par jour autour de la Terre. Bien en évidence parmi les étoiles fixes, trônaient plusieurs astres errants, au nombre de sept: le Soleil, la Lune et les cinq planètes semblables à des étoiles (le mot planète vient d'un mot grec qui signifie "errant"). On les appelaient errants parce que, s'ils participaient à la rotation quotidienne des cieux, ils se déplaçaient aussi, mais plus lentement, sur la toile de fond des étoiles."



Le système de Ptolémée

Cette gravure extraite de l'Harmonica macroscopia d'Andrea Cellarius, XVIIe siècle, nous montre les orbites des planètes, de la Lune et du Soleil autour de la Terre.

"Des siècles s'écoulèrent avant que des hommes d'un courage extraordinaire, osent imaginer que la Terre puisse se déplacer. Il leur fallait, pour cela, surmonter deux obstacles. Le premier, et le moindre, était que l'expérience quotidienne montrait à l'évidence que la Terre ne bougeait pas. Le second, et le plus important, était qu'on ne pouvait concevoir qu'une Terre en mouvement soit le centre de l'Univers : l'humanité serait alors détrônée de son rôle central dans l'ordre des choses, conclusion effrayante que nul laïque, nul théologien quelle que soit sa religion n'était disposé à accepter."

Bien que dès l'Antiquité des personnages, comme Aristarque de Samos, avaient proposés un système dans lequel la Terre était en mouvement, l'école philosophique d'Aristote imposa le système géocentrique, système repris plus tard par l'église catholique. C'est Galilée qui, en soutenant le système de Copernic et en proposant une "nouvelle physique", jouera un rôle clé dans ce qu'on appellera plus tard "la révolution Copernicienne".

Nicolas Copernic 1473-1543



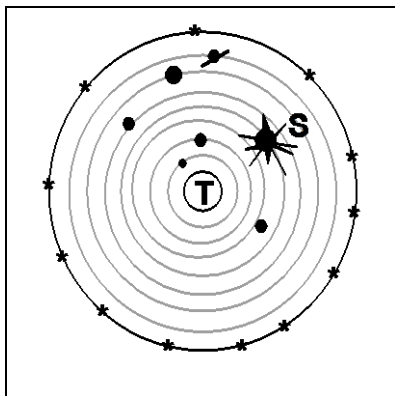
Galileo Galilée 1564-1642



Les systèmes du monde en concurrence à l'époque de Galilée

Système astronomique géocentrique (de l'Antiquité grecque jusqu'au XVIe siècle)

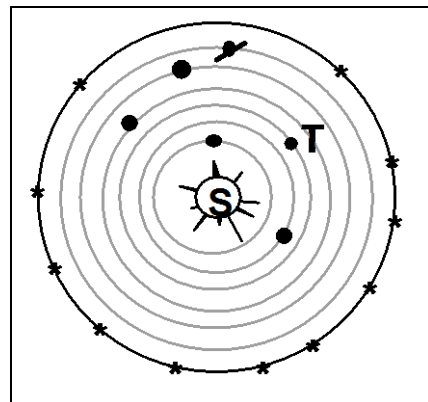
La Terre est au centre et les astres tournent sur des cercles concentriques autour d'elle (le cercle est symbole de perfection).



Ptolémée (2e siècle après J.-C.) explique le mouvement de rétrogradation d'une planète par un double mouvement circulaire: épicycle et déférent (rotation autour de la terre).

Système astronomique héliocentrique proposé par Copernic (1473-1543)

Le Soleil est au centre et les planètes tournent autour du Soleil sur des cercles. La Terre tourne sur elle-même pour expliquer l'alternance jour-nuit.



Kepler (1571-1630) renonce au cercle, et, sur la base d'observations, propose une modification du modèle copernicien: les planètes ont des mouvements elliptiques.

Les "physiques" en concurrence à l'époque de Galilée

Physique d'Aristote

(philosophe du 5e siècle av JC):

Les mouvements naturels (spontanés) sur Terre, pour les quatre éléments, sont verticaux :

- vers le haut pour l'air et le feu,
- vers le bas pour la terre et l'eau.

Ils ont pour but de rétablir l'ordre perturbé.

Ainsi une pierre lâchée tombe pour rejoindre son lieu naturel qu'est la terre (grave).

Les autres mouvements (non-verticaux) sont des mouvements perturbés par violence: "mouvements violents".

Un mouvement violent est constamment entretenu. Exemple: une pierre lancée continue son mouvement grâce aux turbulences de l'air qui la poussent.

Les mouvements naturels des astres sont circulaires uniformes, mûs par le moteur non mû qu'est dieu.

La Terre est immobile car dans le cas contraire, les nuages devaient tous défiler dans le même sens et à grande vitesse et provoquer des cataclysmes.

Physique de Galilée (1564-1642):

Galilée accepte le système copernicien.

Pour lui, la physique (et donc les mouvements) est de même nature sur Terre et dans le ciel (astres). Avec sa lunette, il observe que la Lune a des montagnes et le Soleil des taches; les astres connaissent des "imperfections" comme la Terre.

Il pose le principe d'inertie qui ouvre la possibilité d'une nouvelle physique:

"Etant écartés tous les obstacles extérieurs, un corps pesant sera indifférent au repos et au mouvement et il se conservera dans l'état où il sera placé : au repos, il restera en repos, en mouvement, il restera en mouvement."

La Terre est en mouvement et ce mouvement uniforme ne peut être perçu car la Terre entraîne dans son mouvement les nuages et tous les objets qui se trouvent à sa surface.

Principe d'inertie et arguments de Galilée

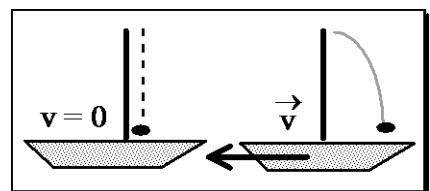
Dès 1613 Galilée se fait ouvertement le champion des idées de Copernic mais c'est en 1632, dans son livre : " Dialogue sur les deux systèmes du monde" qu'il compare les systèmes de Ptolémée et de Copernic en ridiculisant les défenseurs du système géocentrique. C'est en développant sa "nouvelle mécanique" qu'il réfute les idées d'Aristote sur le mouvement.

Extraits

Salviati : "Vous dites : puisque, lorsque le navire est immobile, la pierre tombe au pied du mât, et lorsqu'il se meut, elle tombe loin du pied; inversement, du fait que la pierre tombe au pied du mât on infère que le navire est immobile, et du fait qu'elle tombe loin, il s'ensuit que le navire est en mouvement; et ainsi de la chute de la pierre près du pied de la tour s'infère l'immobilité de la Terre. N'est-ce pas la votre raisonnement ?" "Et Simplicio acquiesçant, Salviati poursuit. "Or, dites-moi, si la pierre, lâchée du haut du mât lorsque le navire marche à grande vitesse, tombait précisément au même point du navire où elle tombe lorsque le navire était immobile, de quel service cette chute vous serait-elle pour vous assurer si le navire est immobile où en marche ?" -Simplicio : "absolument d'aucun." -Salviati : "Très bien. Avez-vous déjà fait cette expérience avec le navire ?" -Simplicio : "Je ne l'ai pas faite; mais je crois bien que les auteurs qui la produisent (comme argument) l'ont soigneusement observée; d'ailleurs, la cause de la différence se reconnaît avec tant de clarté qu'elle ne laisse aucun doute."

Commentaires

Galilée cite une "expérience" utilisée comme argument contre le mouvement de la Terre:



En effet si l'expérience se passe comme on l'imaginait (croquis) alors on peut déduire de la chute verticale d'une pierre (du haut d'une tour sur la Terre) que la Terre est immobile.

Mais si cette "expérience" ne se déroule pas comme indiqué ... ?

Extraits

Salviati : "Et moi, sans expérience, je suis sûr que l'effet s'ensuivra comme je vous le dis, puisqu'il est nécessaire qu'il s'ensuive; et j'ajoute en plus que vous-même vous savez qu'il ne peut s'ensuivre autrement; bien que vous prétendiez ou essayez de feindre que vous ne le savez pas. Mais je suis un *si bon accoucheur des cerveaux* que je vous le ferait confesser de vive force."

Salviati demande à Simplicio : "Donc, dites-moi : si vous aviez une surface plane, polie comme un miroir et d'une matière dure comme l'agate, et qui soit non point parallèle à l'horizon, mais quelque peu inclinée, et que sur cette surface vous posiez une balle parfaitement sphérique et d'une matière grave et extrêmement dure comme, par exemple, du bronze, et qu'elle soit lâchée en liberté, que croyez-vous qu'elle fera ? ne croyez-vous pas (comme je le crois) qu'elle restera immobile ?" -Simplicio : "Si cette surface était inclinée ?" -Salviati : "oui, car c'est ainsi qu'on la suppose être" -Simplicio : "Moi je ne crois pas qu'elle s'arrête aucunement, mais je suis sûr qu'elle se mouvra spontanément vers l'inclinaison."

Salviati : " Et combien durera le mouvement de cette balle, et avec quelle vitesse ? Remarquez bien que j'ai dit une balle parfaitement ronde et un plan parfaitement lisse afin d'écartier tous les empêchements externes et accidentels; et aussi, je veux que vous fassiez abstraction de la résistance de l'air, et de tous les obstacles accidentels s'il pouvait y en avoir d'autres." -Simplicio : "je l'ai bien compris; et, à votre question je réponds que cette balle continuera à se mouvoir in infinito pourvu que le plan s'étende ainsi; elle aura un mouvement continuellement accéléré; car telle est la nature des mobiles graves qui vires acquirit eundo; et la vitesse sera d'autant plus grande que plus grande sera la déclivité."

Salviati : "mais si l'on voulait que la dite balle se meuve vers le haut sur cette même surface, croyez-vous qu'elle le ferait ?" -Simplicio : "Spontanément, non; mais bien si elle est poussée ou jetée avec violence." -Salviati : "Et s'il elle eût été poussée par cet impetus à elle violemment imprimé, quel serait son mouvement et combien durerait-il ?" -Simplicio : "le mouvement irait en retardant et se ralentissant toujours, parce qu'il serait contre nature, et serait plus long ou plus bref selon que l'impulsion serait plus ou moins forte et selon que la déclivité serait plus ou moins grande."

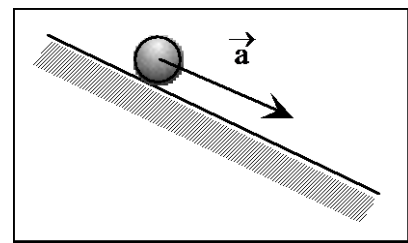
Commentaires

On peut remarquer la prétention de Galilée : "je vous (ses opposants) le ferais **confesser ...**" A relever également les mots : **prétendiez** ou **essayez de feindre**

Cette attitude, très entière, n'est pas étrangère à ce qu'on peut appeler "l'affaire Galilée" (procès, ..).

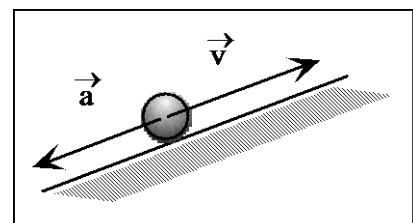
Bien que Galilée soit considéré comme le précurseur de la méthode expérimentale, il nous entraîne ici dans un raisonnement abstrait (Et moi sans expérience...) et curieusement, ne reprend pas l'expérience du bateau citée plus haut. Le raisonnement proposé est basé sur une expérience qu'il faut imaginer : une "expérience de pensée"

a) Bille sur un plan incliné: en l'absence de frottement l'accélération est constante.



Remarque : Galilée insiste pour que le raisonnement se fasse en l'absence de tout frottement (impossible à réaliser expérimentalement).

b) Bille sur le plan ascendant: en l'absence de frottement la décélération est constante.



Extraits

Salviati : "Or, dites-moi ce qui arrivera au même mobile sur une surface qui ne serait ni inclinée ni élevée ?" -Simplicio : "Ici il faut que je pense un peu à la réponse. La surface n'ayant pas de déclivité, il ne peut y avoir d'inclination naturelle au mouvement, et n'ayant pas de montée, il ne peut y avoir de résistance naturelle à être mu. Aussi la balle devra-t-elle demeurer indifférente entre la propulsion et la résistance au mouvement; il me semble donc qu'elle devra rester naturellement arrêtée (au repos)." -Salviati : "Je le crois aussi, lorsqu'on la pose immobile; mais si un impetus vers quelque côté lui était donné, que s'ensuivrait-il ? -Simplicio : "Il s'ensuivrait qu'elle se mouvrait vers ce côté" -Salviati: "Mais quel sera ce mouvement ? continuellement accéléré, comme sur le plan incliné, ou successivement retardé comme sur l'ascendant ?" -Simplicio : "Je ne vois aucune cause d'accélération ni de retard pour ce qu'il n'y a ni déclivité ni acclivité." -Salviati : "Sans doute; mais s'il n'y a pas de cause de retard, bien moins encore doit-il y avoir de cause d'immobilité; combien longtemps donc estimez-vous que le mobile continuera à se mouvoir ? -Simplicio : "Aussi longtemps que durera la longueur de cette surface qui ne s'abaisse ni ne s'élève." -Salviati: "par conséquent, si cet espace était sans terme, le mouvement serait pareillement sans fin, c'est-à-dire éternel ?" -Simplicio : "Il me semble, à condition que le mobile soit d'une matière pouvant durer."

Conclusion:

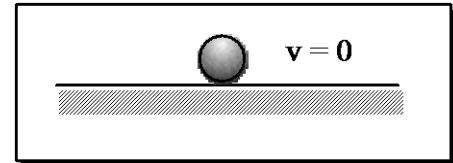
- La vitesse de la balle, même si l'angle est très petit, ne peut que croître.
- La vitesse de la balle, même si l'angle est très petit, ne peut que décroître.
- Par conséquent, sur le plan horizontal, la vitesse ne peut ni croître ni décroître, elle est constante. Par le **raisonnement uniquement**, il est possible de postuler une situation intermédiaire entre les deux plans inclinés, celle du plan horizontal, où un mobile peut idéalement continuer son mouvement sans fin en l'absence de toute force de propulsion.

Si un mobile persiste dans son mouvement sans être propulsé, on peut conclure que la pierre tombant du haut du mât ("expérience du bateau") garde le mouvement horizontal du bateau et arrive, dans tous les cas, au pied du mât. De même, tout objet sur la Terre a le mouvement de celle-ci et le conserve.

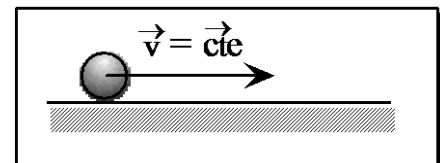
Commentaires

c) Bille sur un plan horizontal:

- Si on la pose immobile elle reste immobile.

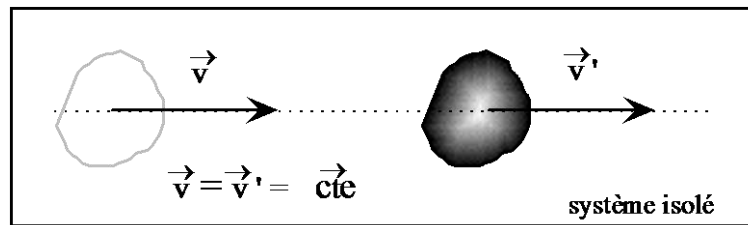


- Si on la lance avec une vitesse v, \vec{v} ,** (en l'absence de frottement) **elle conserve sa vitesse** (grandeur, direction et sens).



Principe d'inertie de Galilée (Descartes, Newton)

En l'absence d'action extérieure, un corps se déplace à vitesse constante (en grandeur et en direction), c'est-à-dire en **mouvement rectiligne uniforme : MRU**.



Remarques:

- La trajectoire est une droite.
- Le cadre matérialise le "système isolé" et indique qu'il n'y a aucune action extérieure agissant sur le mobile ou, ce qui revient au même, aucune interaction entre le mobile et l'extérieur.
- Galilée par ce principe montre que ses prédécesseurs avaient posé le problème à l'envers et qu'il n'est nul besoin de chercher une explication au mouvement rectiligne et uniforme d'un objet.

Généralisation

La situation d'un corps ne subissant aucune action extérieure est totalement idéalisée. Aucun corps ne peut être totalement isolé, c'est-à-dire ne subir aucune influence extérieure à lui-même. Un objet (sonde spatiale) lancé loin de tout astre pourrait se rapprocher de cette situation idéale.

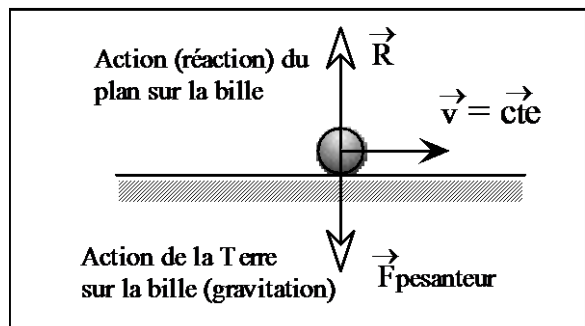
Ainsi nous dirons de façon plus concrète :

Si la somme des actions extérieures agissant

sur un corps est nulle ($\sum \vec{F} = \vec{0}$), la vitesse (vecteur vitesse) de ce corps est constante.

Exemple :

La bille sur le plan horizontal, même en l'absence de tout frottement, subit deux actions extérieures qui s'annulent.



La quantité de mouvement

Pour représenter le mouvement d'un corps, Descartes a construit une grandeur physique appelée quantité de mouvement.

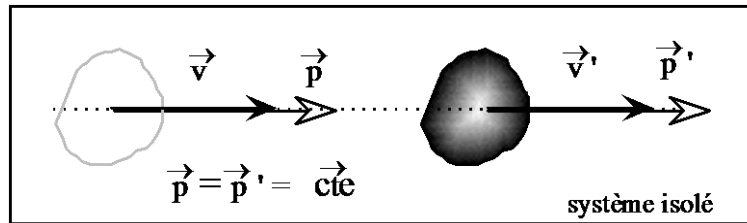
Elle correspond au produit de la masse par la vitesse d'un corps:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Unités	m :	[kg]	(S.I.)
	v :	[$\frac{m}{s}$]	(S.I.)
	p :	[$kg \cdot \frac{m}{s}$]	

La loi d'inertie de Galilée s'exprime alors de la façon suivante:

Si la somme des actions extérieures agissant sur un corps est nulle, sa quantité de mouvement \vec{p} est conservée:



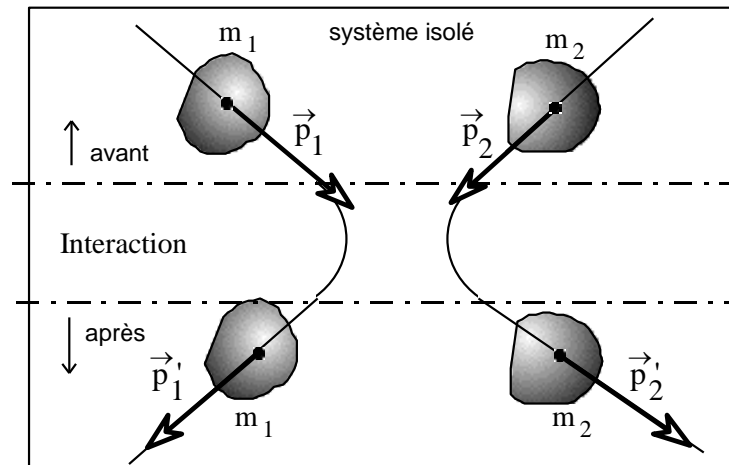
Remarque:

La quantité de mouvement est une grandeur particulièrement intéressante lorsque l'on considère un ensemble de corps. En effet, si deux ou plusieurs corps, formant un système isolé, interagissent (agissent l'un sur l'autre), leur quantité de mouvement totale est conservée :

$$\text{Principe de la conservation de la quantité de mouvement : } \vec{p} = \vec{p}'$$

Un principe en physique ne peut être démontré, on peut seulement constater sa validité dans diverses situations.

Appliqué à un système formé de deux corps: $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$

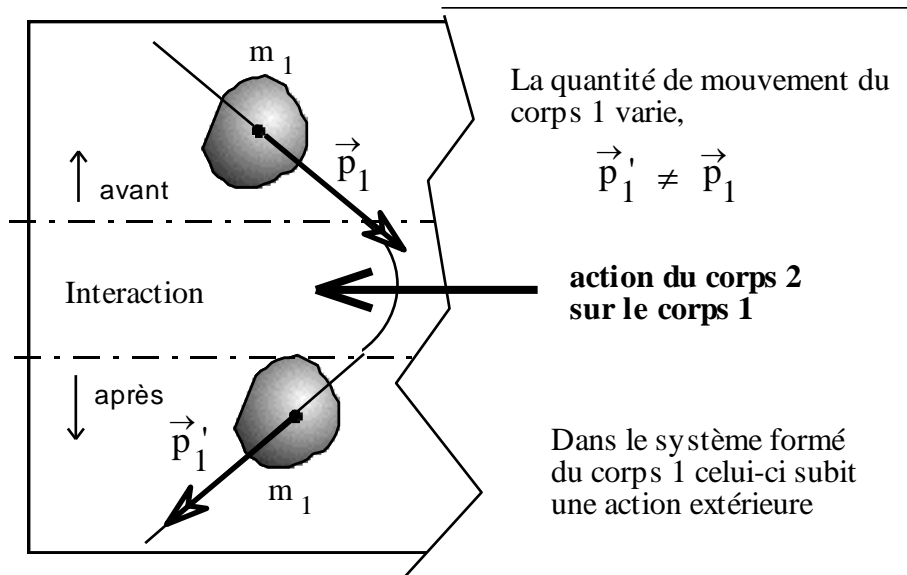


Loi fondamentale de la dynamique ou 2e loi de Newton

La loi d'inertie de Galilée implique le corollaire suivant :

**Si un corps subit une action extérieure,
sa quantité de mouvement (donc sa vitesse) varie.
Réciproquement, si la quantité de mouvement d'un corps varie,
cela signifie qu'il subit une action extérieure.**

Reprenons nos deux corps en interaction en considérant le système formé du seul corps 1.
Ce système n'est plus un système isolé, le corps subit l'action (extérieure) du corps 2.



Une première "mesure" de cette action extérieure peut être obtenue en calculant la variation de la quantité de mouvement pour le corps 1: $\Delta \vec{p} = \vec{p}_1' - \vec{p}_1$

Cette grandeur $\Delta \vec{p}$, appelée aussi impulsion, n'est pas suffisante pour caractériser l'interaction car plus cette variation se produit dans un intervalle de temps court et plus l'action extérieure est intense.

Ainsi l'action extérieure ou force (pour une masse constante) est déterminée par le rapport:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = m \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m \cdot \vec{a}$$

Unités: $1 \text{ [N]} = 1 \left[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
--

On constate que les vecteurs $\Delta \vec{v}$, \vec{a} , $\Delta \vec{p}$ et \vec{F} sont parallèles et de même sens, la masse et l'intervalle de temps étant toujours positifs.

Remarque:

La force définie ci-dessus est la force moyenne mais rien ne nous empêche de définir les

grandeurs instantanées : $\vec{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$

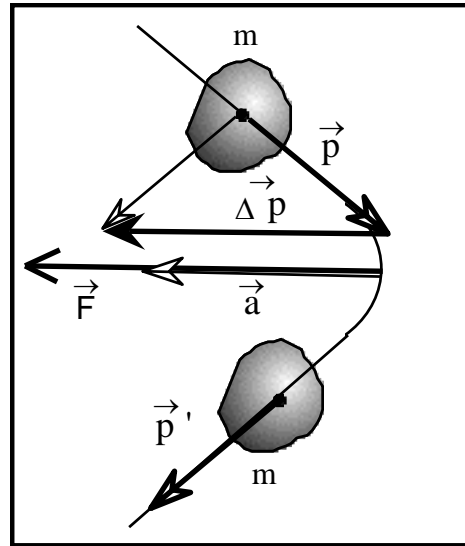
Loi fondamentale de la dynamique :

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

\vec{F} est la force résultante

m est masse du corps subissant la force: **inertie**

\vec{a} est l'accélération du corps



Remarques :

- 1) \vec{F} est la **résultante des forces agissant de l'extérieur sur le corps** de masse m .
- 2) La masse m représente la **somme des masses mises en mouvement** (accélérées). C'est une constante dans la loi fondamentale de la dynamique.
- 3) La loi fondamentale a un caractère général. Elle est **valable quelle que soit la nature des forces** (force de gravitation, de frottement, force électrique, force du vent, etc.).
- 4) La loi fondamentale de la dynamique peut être interprétée comme une loi de causalité: la **cause** est la **force résultante** ($\neq 0$) qui produit comme **effet** une **accélération**.

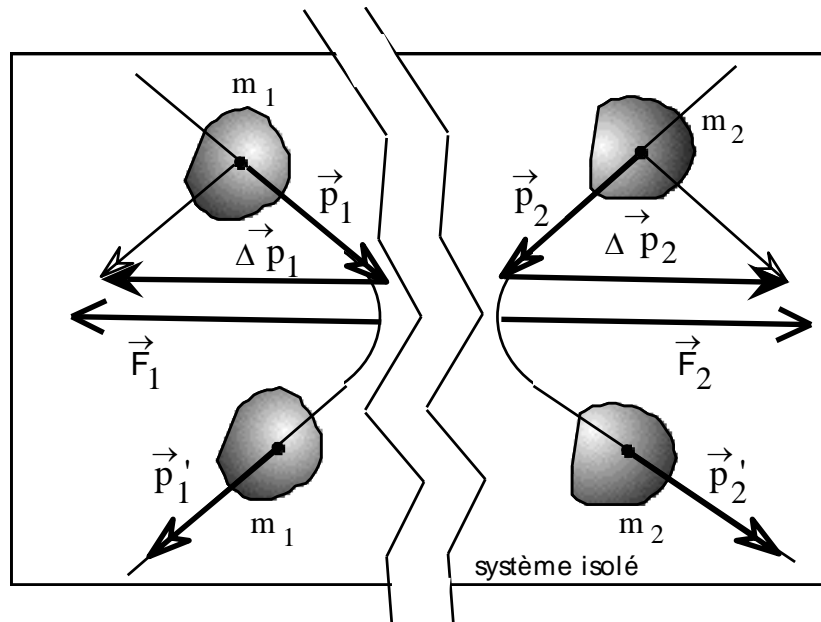
La loi de l'action et de la réaction ou 3e loi de Newton

Pour deux corps formant un système isolé, nous avons déjà dit que la quantité de mouvement

totale est constante: $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2$

Cette égalité peut aussi s'écrire: $\vec{p}_1 - \vec{p}'_1 = \vec{p}'_2 - \vec{p}_2$

ce qui revient à considérer chaque corps séparément :



Les variations de quantité de mouvement sont égales et opposées: $\vec{\Delta p}_1 = - \vec{\Delta p}_2$

Les temps d'interaction Δt étant le même pour les deux corps, on peut écrire en divisant par le temps Δt :

$$\vec{F}_1 = - \vec{F}_2$$

\vec{F}_1 est la force exercée par le corps 2 sur le corps 1

\vec{F}_2 est la force exercée par le corps 1 sur le corps 2

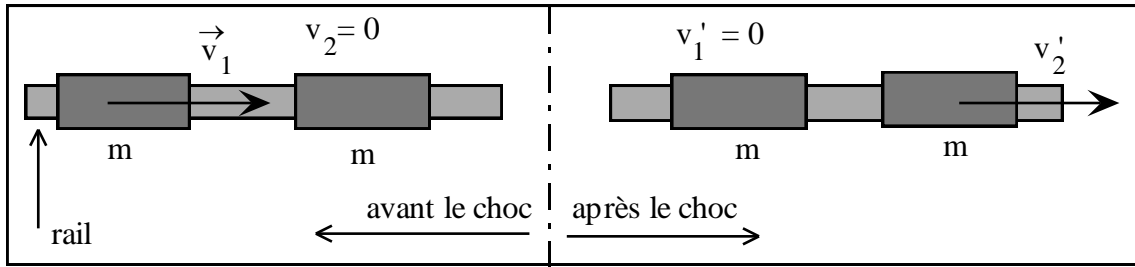
A toute **action** correspond une **réaction** équivalente et opposée.
 Il n'y a jamais de force unique mais **toujours des couples de forces**.
 Attention, les deux forces de l'interaction **ne s'exercent pas sur le même corps**.

Remarque:

Une des forces est appelée **l'action** et l'autre la **réaction**. Il n'est pas toujours possible de définir un rôle **actif** pour **l'action** et **passif** pour la **réaction**.

Annexe 1 : Vérification de $\vec{p} = c\vec{t}e$ (1 dimension)

a) Choc élastique entre deux chariots de même masse



Vérification expérimentale de $\vec{p} = \vec{p}'$

Remarque

les vecteurs \vec{p} et \vec{p}' ayant même direction et même sens et, de plus, les masses étant identiques, on peut vérifier dans ce cas :

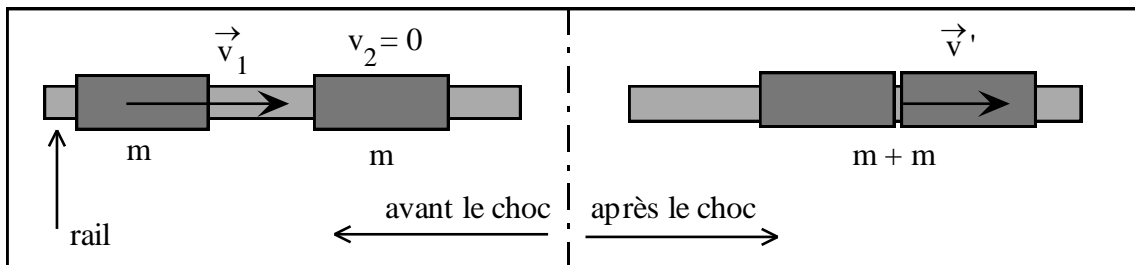
$$v_1 = v_2'$$

Mesures et calculs

$m = \dots\dots\dots$ [kg]; $t_1 = \dots\dots$ [s]; $t_2 = \dots\dots$ [s].

$v_1 = \dots\dots\dots$ [m/s] $v_2' = \dots\dots\dots$ [m/s]

b) Choc mou entre deux chariots de même masse (les chariots restent collés)



Vérification expérimentale de $\vec{p} = \vec{p}'$

Remarque:

les vecteurs \vec{p}_1 et \vec{p}' ayant même direction et même sens,

on peut vérifier dans ce cas: $p_1 = p'$

$$m \cdot v_1 = 2m \cdot v'$$

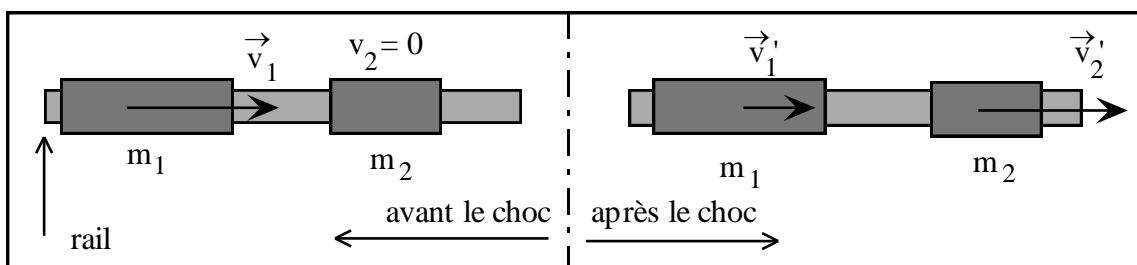
Mesures et calculs

$m = \dots\dots\dots$ [kg]; $t_1 = \dots\dots$ [s]; $t' = \dots\dots$ [s].

$v_1 = \dots\dots\dots$ [m/s] $v' = \dots\dots\dots$ [m/s]

$\dots\dots\dots = \dots\dots\dots$

c) Choc élastique avec des chariots de masses différentes:



Vérification expérimentale de $\vec{p} = \vec{p}'$

Remarque:

les vecteurs \vec{p}_1 ; \vec{p}'_1 et \vec{p}'_2 ayant même direction et même sens,

on peut vérifier dans ce cas: $p_1 = p'_1 + p'_2$

$$m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2$$

Mesures et calculs

$$m_1 = \dots\dots\dots[\text{kg}]; \quad t_1 = \dots\dots [\text{s}]; \quad t'_1 = \dots\dots [\text{s}].$$

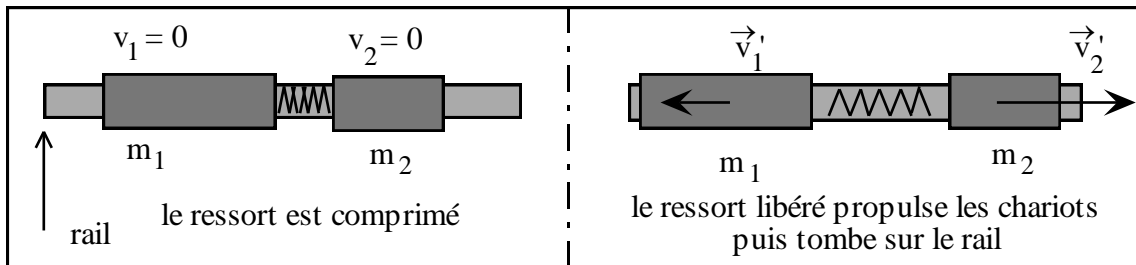
$$m_2 = \dots\dots\dots[\text{kg}]; \quad t_2 = \dots\dots [\text{s}]; \quad t'_2 = \dots\dots [\text{s}].$$

$$v_1 = \dots\dots\dots [\text{m/s}] \quad v'_1 = \dots\dots\dots [\text{m/s}]$$

$$v'_2 = \dots\dots\dots [\text{m/s}]$$

$$\dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

d) Chariots de masses différentes mus sous l'action d'un ressort:



Vérification expérimentale de $\vec{p} = \vec{p}'$

Remarque:

les vecteurs $\vec{p} = \vec{p}' = 0$ ainsi \vec{p}'_1 et \vec{p}'_2 sont des vecteurs opposés ($\vec{p}'_1 = -\vec{p}'_2$)

on peut vérifier dans ce cas: $p'_1 = p'_2$

$$m_1 \cdot v'_1 = m_2 \cdot v'_2$$

Mesures et calculs

$$m_1 = \dots\dots\dots[\text{kg}]; \quad t'_1 = \dots\dots [\text{s}].$$

$$m_2 = \dots\dots\dots[\text{kg}]; \quad t'_2 = \dots\dots [\text{s}].$$

$$v'_1 = \dots\dots\dots [\text{m/s}] \quad v'_2 = \dots\dots\dots [\text{m/s}]$$

$$\dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$