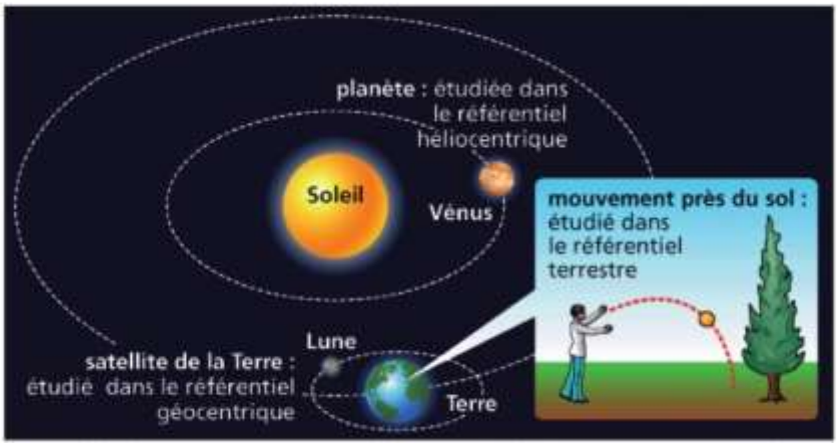
Les outils de la mécanique classique

De l'atome aux galaxies, la matière est en mouvement.
La mécanique se donne pour but de décrire le mouvement d'objets appelés systèmes ; l'étude est dans un premier temps ramenée à celle du mouvement de leur centre d'inertie. La cinématique est l'étude des mouvements en fonction du temps, indépendamment des causes qui les produisent ; la dynamique s'intéresse aux liens entre les mouvements des objets et les actions qu'ils subissent.

1 – Référentiel d'étude

1.1 – Notion de référentiel

Un référentiel est un objet par rapport auquel est étudié le mouvement d'un système. Il est muni d'un repère d'espace et d'une échelle de temps.
Le référentiel terrestre, lié à la Terre, est adapté à l'étude du mouvement d'un objet proche de la surface de la Terre. Tout objet fixe par rapport à la surface terrestre peut-être considéré comme origine d'un référentiel terrestre.
Les référentiels astrocentriques sont liés au centre d'un astre et associés à des axes de directions fixes par rapport aux étoiles lointaines.

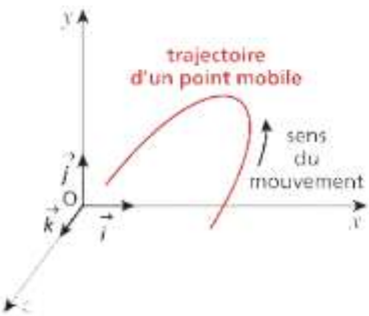


Ainsi, les satellites de la Terre peuvent être étudiés dans le référentiel géocentrique (lié au centre de la Terre) ; les planètes sont généralement étudiées dans le référentiel héliocentrique (lié au centre du Soleil).

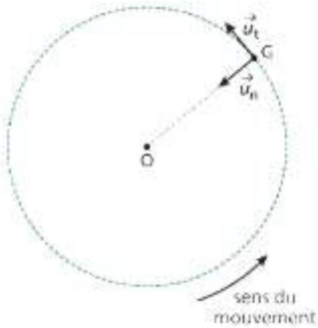
1.2 – Repères

Le repère est défini par le mécanicien de façon à ce que l'étude menée reste simple.

- Le repère cartésien a pour origine O fixe et pour vecteurs unitaires $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ constants.
- Le repère de Frénet a pour origine le point en mouvement ; ses vecteurs unitaires sont $\vec{u_t}$ tangent à la trajectoire et dans le sens du mouvement, et $\vec{u_n}$ perpendiculaire à $\vec{u_t}$ et vers l'intérieur de sa trajectoire. Le repère de Frénet est particulièrement adapté à l'étude des mouvements circulaires ; pour un tel mouvement, $\vec{u_n}$ est orienté vers le centre du cercle.



Repère cartésien



Repère de Frénet

2 – Cinématique du point matériel

2.1 – Vecteur position $\overrightarrow{OG}(t)$

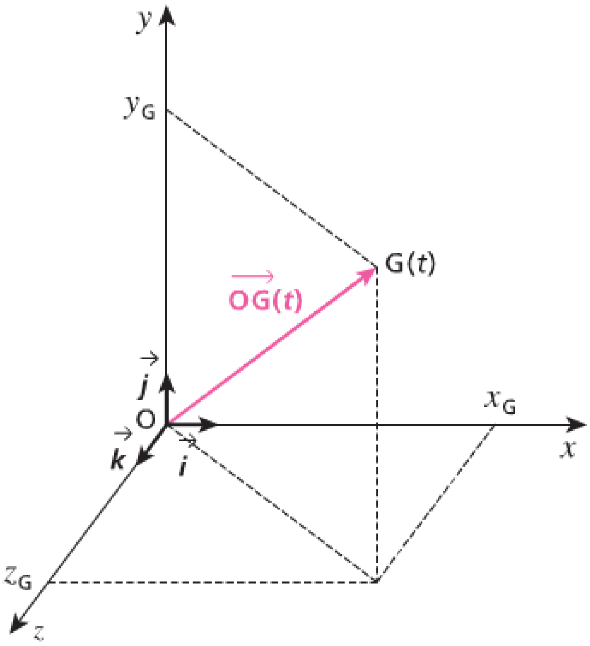
Lorsque l'étude du mouvement d'un solide est réduite à celle de son centre d'inertie G, seule les informations relatives à la rotation du solide sur lui-même sont perdues. On caractérise alors le mouvement d'ensemble du solide.
Le vecteur position a pour coordonnées

$$\begin{pmatrix} x_G(t) \\ y_G(t) \\ z_G(t) \end{pmatrix} \text{ souvent notées } \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}$$

Ce vecteur s'écrit également avec ses composantes,

$$\overrightarrow{OG}(t) = x(t).\vec{i} + y(t).\vec{j} + z(t).\vec{k}$$

Les équations donnant *x(t)*, *y(t)* et *z(t)* sont appelées *équations horaires* de la position. De nombreux mouvements sont contenus dans un plan et ne nécessitent que deux coordonnées descriptives, selon $\vec{i}$ et $\vec{j}$; dans ce cas, l'équation *cartésienne* de la trajectoire est la donnée de *y* en fonction de *x*.



2.2 – Vecteur vitesse $\vec{v}(t)$

La vitesse *moyenne* $\bar{v}$ d'un point entre deux positions est la distance parcourue divisée par la durée du parcours.
La vitesse *instantanée* *v(t)* au point G, ou vitesse tout court, est égale à sa vitesse moyenne entre deux positions infiniment proches.

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \overrightarrow{OG}}{\Delta t} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}(t)$$

Le vecteur vitesse instantanée $\vec{v}(t)$ d'un point G est la dérivée du vecteur position par rapport au temps. Pour en savoir plus sur la notation différentielle de la dérivée, voir annexe.
Ses coordonnées sont

$$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = \dfrac{dx}{dt}(t) \\ v_y(t) = \dfrac{dy}{dt}(t) \\ v_z(t) = \dfrac{dz}{dt}(t) \end{cases}$$

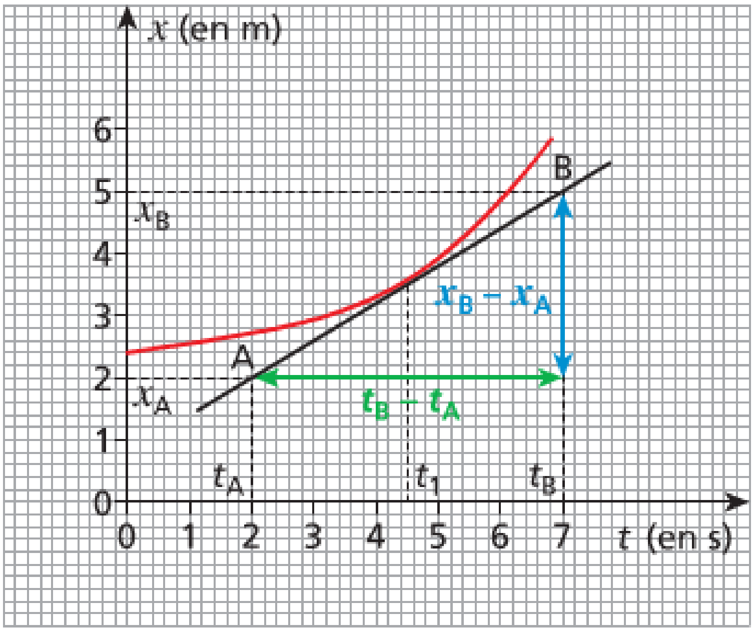
La *valeur* de la vitesse est alors donnée par

$$v(t) = \sqrt{\left(v_x(t)\right)^2 + \left(v_y(t)\right)^2 + \left(v_z(t)\right)^2}$$

Les caractéristiques du vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ sont

- direction : tangente à la trajectoire
- sens : celui du mouvement
- norme ou valeur : valeur de la vitesse instantanée à la date t, exprimée en $m.s^{-1}$

La vitesse v_x à une date donnée se lit comme le coefficient directeur de la tangente à la courbe représentative de $x = f(t)$ à cette date.

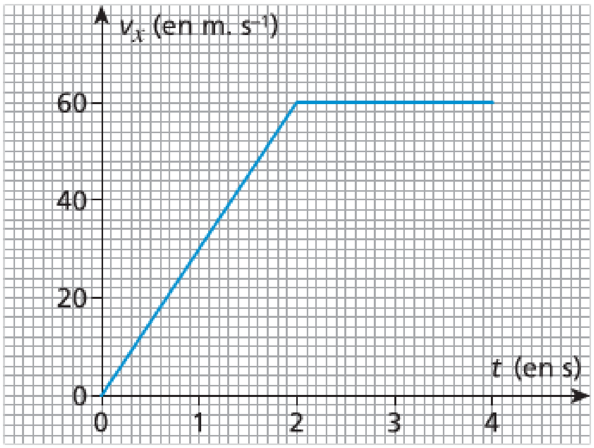


Pour déterminer $v_x(t_1)$, il faut tracer la tangente à la courbe $x = f(t)$ à la date $t = t_1$ et déterminer son coefficient directeur,

$$v_x(t_1) = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} = \frac{5{,}0 - 2{,}0}{7{,}0 - 2{,}0} = 0{,}60 m.s^{-1}$$

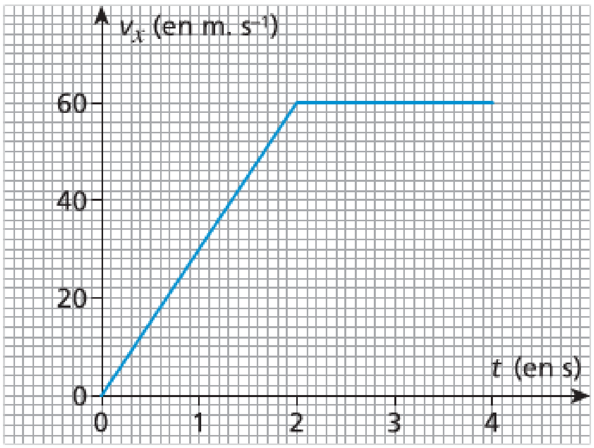
2.3 – <u>Vecteur accélération</u> $\vec{a}(t)$

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps : elle s'exprime en m.s^{-2}. Ci-contre, la vitesse augmente uniformément (accélération de valeur constante) puis est constante (accélération de valeur nulle).



Un objet a un vecteur accélération non nul si la valeur de sa vitesse varie ou si le vecteur vitesse change de direction (ou les deux à la fois). A tout instant t, l'accélération peut être vue comme

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}(t)$$



Le vecteur accélération instantanée d'un point G est don

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}(t) = \frac{d^2\overrightarrow{OG}}{dt^2}$$

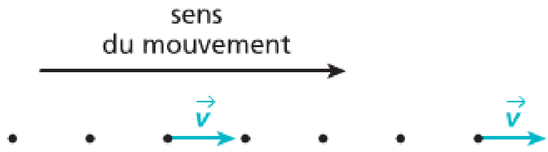
Ses coordonnées sont

$$\vec{a}(t) \begin{cases} a_x(t) = \dfrac{dv_x}{dt}(t) \\ a_y(t) = \dfrac{dv_y}{dt}(t) \\ a_z(t) = \dfrac{dv_z}{dt}(t) \end{cases} \quad \text{soit} \quad \vec{a}($$

2.4 – Mouvements rectilignes

Mouvement rectiligne et uniforme

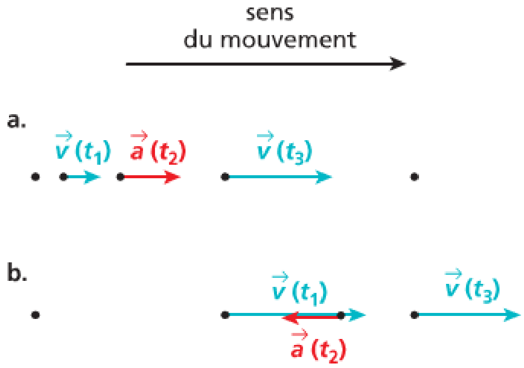
La trajectoire d'un point est une droite et sa vitesse est constante.
Son vecteur accélération est nul.

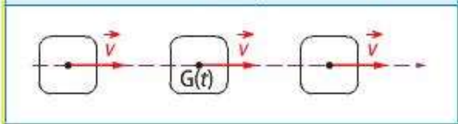
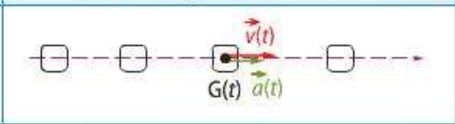
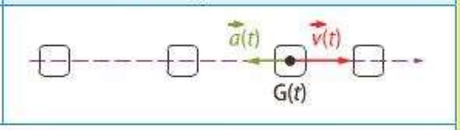


Mouvement rectiligne et uniformément varié

La trajectoire du point est une droite et la valeur de sa vitesse est une fonction linéaire du temps.
Son vecteur accélération est constant et a la même direction que la trajectoire,

- $\vec{a}$ est dans le sens du mouvement s'il est accéléré (cas a)
- $\vec{a}$ est dans le sens opposé au mouvement s'il est ralenti (cas b)



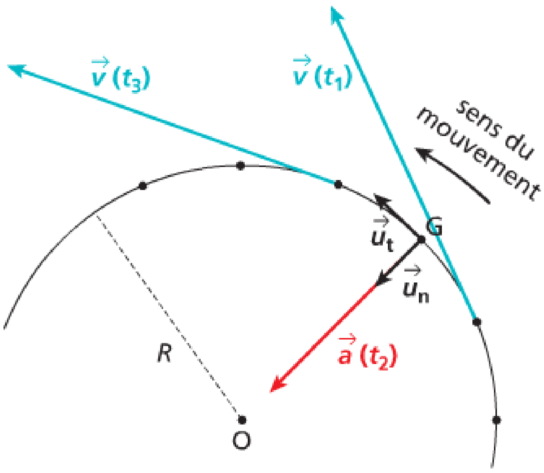
Mouvement rectiligne uniforme	Mouvement rectiligne uniformément accéléré	Mouvement rectiligne uniformément ralenti
		
Le vecteur vitesse $\vec{v}$ est constant au cours du temps : $\vec{v}(t)=\vec{v}=\overrightarrow{\text{constante}}$. $\vec{a}=\vec{0}$ donc $\vec{v}\cdot\vec{a}=0$.	Le vecteur accélération est constant au cours du temps : $\vec{a}(t)=\vec{a}=\overrightarrow{\text{constante}}$.	
	Les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{a}$ sont de même sens. La valeur de v augmente. $\vec{v}\cdot\vec{a}>0$.	Les vecteurs $\vec{v}$ et $\vec{a}$ sont de sens opposés. La valeur de v diminue. $\vec{v}\cdot\vec{a}<0$.

2.5 – Mouvement circulaires

Mouvement circulaire uniforme

La trajectoire du point est circulaire et la valeur de la vitesse reste constante.

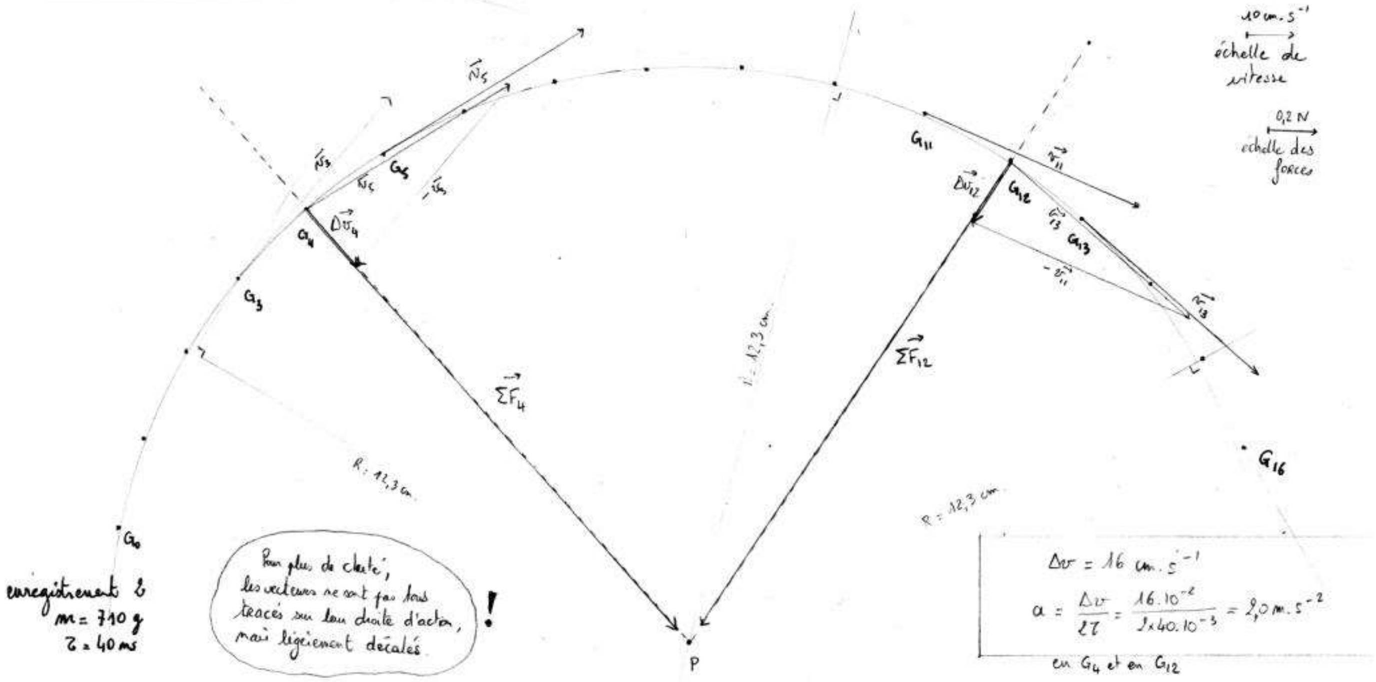
- Son vecteur vitesse est tangent à la trajectoire ; dans la base de Frénet, il s'écrit
- Son vecteur accélération est porté par le rayon de la trajectoire (vecteur radial) et est orienté vers le centre du cercle de rayon R (vecteur centripète). Sa valeur est constante. Dans le repère de Frénet, il s'écrit $\vec{a}=\frac{v^2}{R}\overrightarrow{u_N}$



Démonstration : voir l'étude expérimentale du mouvement d'un mobile autoporteur attaché par une ficelle tendue à un plot fixe.

La grandeur $\frac{v^2}{r}$ a les dimensions d'une accélération.

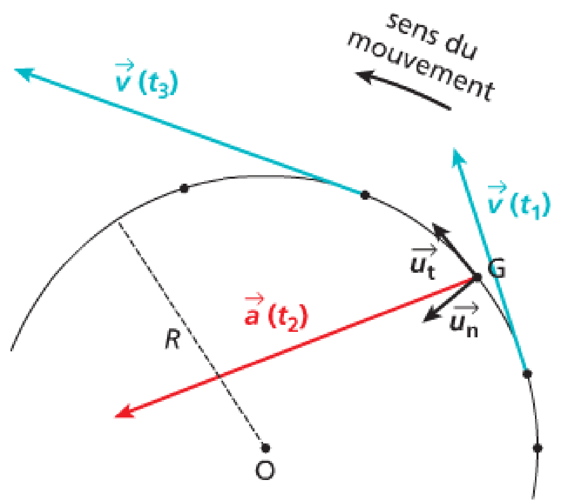
$$\left[\frac{v^2}{r}\right]=\frac{[v]^2}{[r]}=\frac{\left(L.T^{-1}\right)^2}{L}=L.T^{-2}=[a]$$



Le mouvement est uniforme : la valeur de la vitesse est constante et vaut 50 cm.s⁻¹.

Nous vérifions que $\frac{v^2}{r}=\frac{\left(50.10^{-2}\right)^2}{12,3.10^{-2}}=2,0\,m.s^{-2}$.

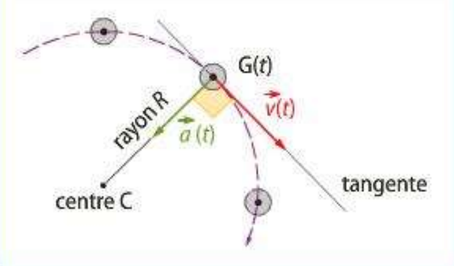
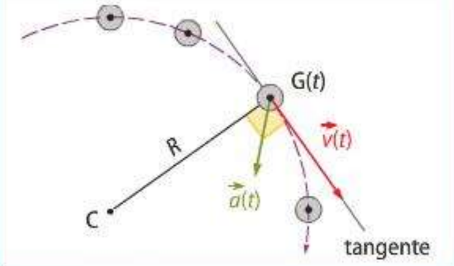
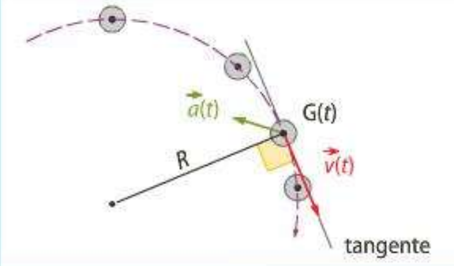
Mouvement circulaire non uniforme



La trajectoire du point est circulaire et la valeur de sa vitesse varie.
Son vecteur est tangent à la trajectoire.
Son vecteur accélération est quelconque, vers l'intérieur de la trajectoire et son expression dans le repère de Frénet est

$$\vec{a}=\frac{dv}{dt}\overrightarrow{u_T}+\frac{v^2}{R}\overrightarrow{u_N}$$

Dans le cas d'un mouvement uniforme, $\frac{dv}{dt}=0$: on retrouve la relation $\vec{a}=\frac{v^2}{R}\overrightarrow{u_N}$.

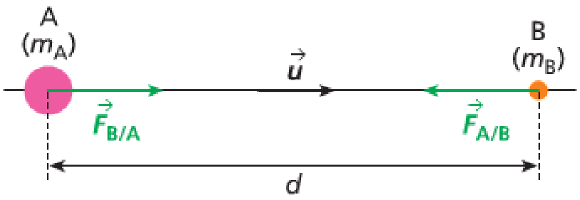
Mouvement circulaire uniforme	Mouvement circulaire uniformément accéléré	Mouvement circulaire uniformément ralenti
		
Le vecteur vitesse $\vec{v}(t)$ varie mais sa valeur v reste constante. Le vecteur accélération $\vec{a}$ est dirigé vers le centre de la trajectoire. $\vec{v}\cdot\vec{a}=0$.	Le vecteur accélération est constant au cours du temps : $\vec{a}(t)=\vec{a}=\overrightarrow{\text{constante}}$. Il est toujours dirigé vers l'**intérieur** de la trajectoire.	
	La valeur de la vitesse v augmente. $\vec{v}\cdot\vec{a}>0$.	La valeur de la vitesse v diminue. $\vec{v}\cdot\vec{a}<0$.

3 – Forces usuelles

Une force modélise une action mécanique exercée sur le système ; elle se représente par un vecteur. En voici quelques exemples.

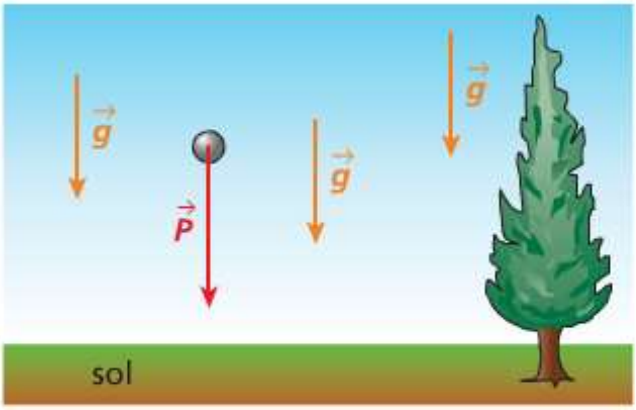
3.1 – Force gravitationnelle

La force gravitationnelle, toujours attractive, est la force exercée par un corps A sur un corps B. Si tous deux sont à répartition sphérique de masse, ils peuvent être assimilés à un point matériel et la force gravitationnelle s'écrit



$$\overrightarrow{F_{A/B}} = -\frac{Gm_Am_B}{d^2}\vec{u} = -\overrightarrow{F_{B/A}}$$

où G = 6,67.10^{-11} N.m^2.kg^{-2} est la constante de gravitation universelle,
m_A et m_B sont les passes respectives des corps A et B en interaction, en kg
d est la distance entre les centres des corps en interaction, en m
$\vec{u}$ est un vecteur unitaire orienté de A vers B



Le poids d'un objet de masse m est la force gravitationnelle qu'il subit de par son interaction avec la Terre,

$$\vec{P} = m\,\vec{g}$$

où le vecteur champ de pesanteur $\vec{g}$ caractérise l'attraction de la Terre en chaque point à proximité de sa surface. Le poids d'un objet est vertical, orienté vers le bas et de valeur P = mg.

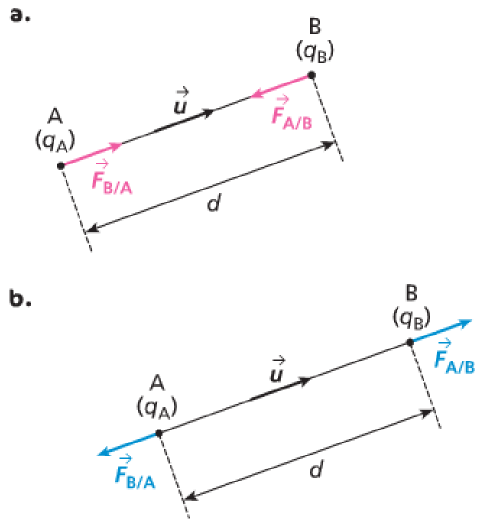
Exercice : montrer qu'à l'altitude z, l'intensité du champ de pesanteur terrestre s'écrit

$$g(z) = \frac{G\,M_{Terre}}{\left(R_{Terre}+z\right)^2}$$

et calculer sa valeur (célèbre) au niveau de la mer (z = 0).

3.2 – Force électrique

La force électrique, appelée force de Coulomb, modélise l'interaction entre deux objets portant des charges électriques q_A et q_B, exprimées en coulombs (C).



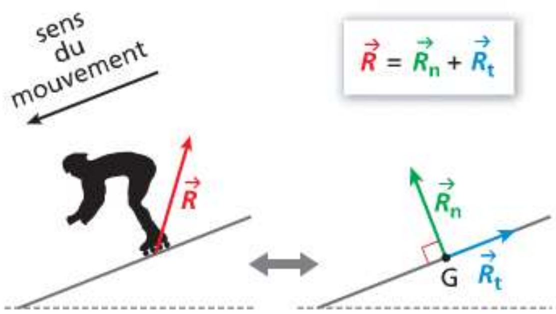
$$\overrightarrow{F_{A/B}} = K\frac{q_A q_B}{d^2}\vec{u} = -\overrightarrow{F_{B/A}}$$

où K est une constante valant K = 9,0.10^9 N.m^2.C^{-2}
d est la distance entre les centres des objets chargés, en m
$\vec{u}$ est un vecteur unitaire orienté de A vers B

3.3 – Forces de contact entre solides

La force de contact exercée par un solide sur un système est appelée réaction du support et notée $\vec{R}$. Elle est décomposée comme la somme de

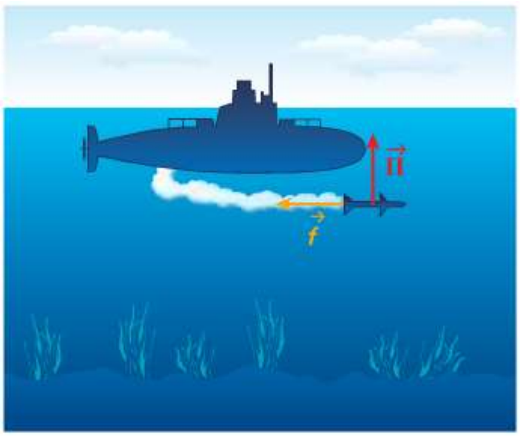
- La réaction normale $\overrightarrow{R_N}$ traduisant le fait que les solides ne s'interpénètrent pas
- La réaction tangentielle $\overrightarrow{R_T}$, encore appelée force de frottement solide, traduisant la résistance du support au mouvement du système



3.4 – Forces exercées par les fluides

Les forces de contact exercées par un fluide (liquide ou gaz) sur un système sont de deux types,

- La poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ est verticale et orientée vers le haut, souvent négligée pour les objets lourds dans l'air. Sa valeur est $\Pi = \rho V g$ où ρ est la masse volumique du fluide, V le volume qu'occupe l'objet immergé, et g l'intensité de pesanteur : c'est le poids de fluide déplacé.
- La force de frottement fluide $\vec{f}$ traduit la résistance du fluide au mouvement du système. Cette force est opposée au sens du mouvement du système, nulle si le système est immobile dans le référentiel du fluide.



3.5 – Force de tension d'un fil inextensible

Cette force est souvent notée $\vec{T}$; sa direction est celle du fil, elle est orientée de l'extrémité en contact avec le système vers l'extrémité opposée du fil.

4 – Lois de la mécanique newtonienne

4.1 – Première loi de Newton : principe d'inertie

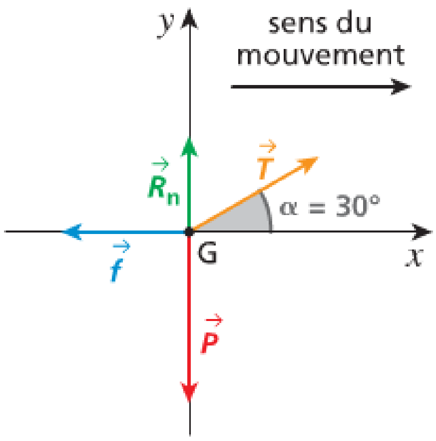
Les systèmes soumis à des forces extérieures dont la somme vectorielle est nulle sont appelés systèmes pseudo-isolés (ou isolés s'ils ne subissent aucune force – cas idéal).

Le centre d'inertie d'un système isolé est en mouvement rectiligne et uniforme ou au repos dans un référentiel galiléen.
De manière équivalente : $\left(\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0}\right) \Leftrightarrow \left(\vec{v} = \overrightarrow{cste}\right)$

Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel la première loi de Newton est vérifiée.
Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est galiléen.
Un référentiel n'est donc pas galiléen s'il tourne, accélère ou freine par rapport à un référentiel galiléen.

Remarque
Aucun référentiel n'est galiléen en toute rigueur, toutefois la durée des mouvements observés autorise cette approximation :
- le référentiel héliocentrique peut être considéré comme galiléen pour l'étude du mouvement des planètes autour du Soleil
- le référentiel géocentrique peut être considéré comme galiléen pour l'étude d'expériences n'excédant pas quelques jours (mouvement des satellites terrestres)
- le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen pour des expériences à proximité de la surface de la Terre et ne dépassant pas quelques minutes.

Exemple d'application



Connaissant la valeur de T, on en déduit rapidement la valeur de f. Par exemple, si T = 12 N, on montre que f = 10 N.

4.2 – Quantité de mouvement

La quantité de mouvement $\vec{p}(t)$ d'un objet de masse m et dont le centre d'inertie a la vitesse $\vec{v}(t)$ est définie par

$$\vec{p}(t) = m\vec{v}(t)$$

où la masse m est en kg et la valeur de la vitesse en $m.s^{-1}$.
Si la masse du système reste constante, la quantité de mouvement est proportionnelle à la vitesse ; l'intérêt de cette grandeur est précisément qu'elle tient compte de la masse, c'est-à-dire de l'inertie, du système étudié.

Exemple
Lors d'un match de tennis, Ivo Karlovic a frappé une balle de service de masse m = 58 g à la vitesse v = 251 km/h. La quantité de mouvement de la balle était

$$p = mv = 58.10^{-3} \times \frac{251.10^{3}}{3600} = 4,0\,kg.m.s^{-1}$$

La première loi de Newton peut s'énoncer en termes de quantité de mouvement :

> Dans un référentiel galiléen, la quantité de mouvement d'un système pseudo-isolé est constante.

4.3 – Deuxième loi de Newton : principe fondamental de la dynamique

> La somme vectorielle des forces extérieure $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ (ou résultante) qui s'exercent sur un système de masse m est égale à la variation temporelle de sa quantité de mouvement dans un référentiel galiléen
>
> $$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt}(t)$$
>
> Si la masse du système est constante, cette loi s'écrit
>
> $$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m\vec{a}(t)$$

La résultante des forces exercée sur un système de masse (*inertielle*, et non *grave*) constante est donc colinéaire au vecteur accélération de son centre d'inertie et de même sens que lui ; le coefficient de proportionnalité n'est alors autre que la masse (inertielle) du système.
Cette loi généralise le principe d'inertie (1ère loi de Newton) au cas de systèmes qui ne sont ni isolés, ni pseudo-isolés. Elle stipule que la résultante des actions mécaniques est responsable de la variation de la quantité de mouvement

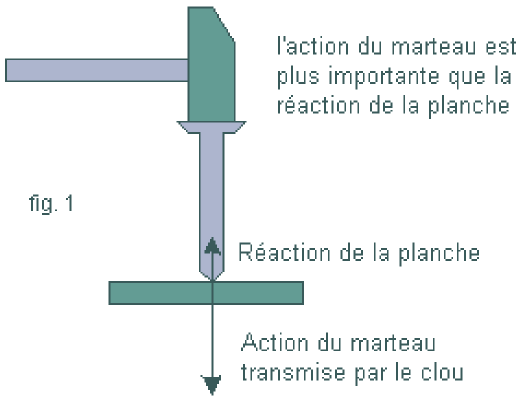
4.4 – Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques

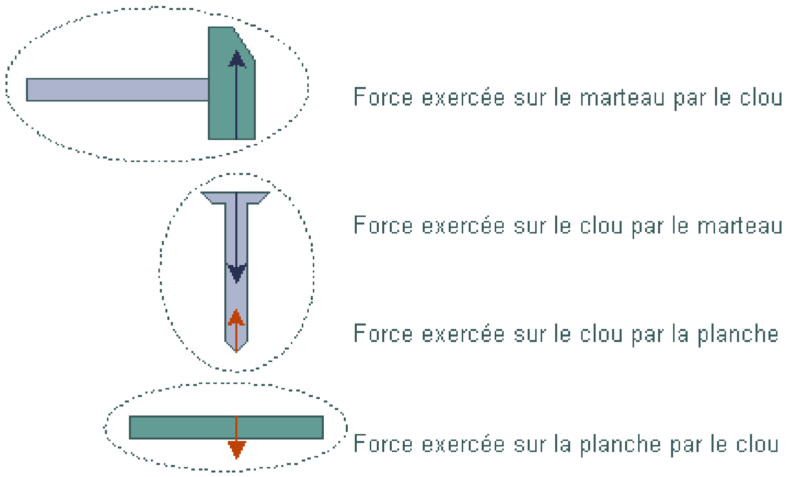
Contrairement aux deux premières lois de Newton, cette troisième loi ne relie pas le mouvement aux forces : elle concerne deux systèmes en interaction.

> Deux corps en interaction exercent l'un sur l'autre des forces opposées.
> Le corps A, exerçant sur B une force $\vec{F}_{A/B}$, subit de la part de B une force $\vec{F}_{B/A}$ telle que
>
> $$\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$$

Inutile de se soucier du référentiel d'étude, puisque cette loi ne fait aucun lien entre le mouvement et ses causes ; elle s'applique aussi bien que A et B soient au repos, ou en mouvement.

<u>Exemple</u> : un lieu commun





Une analyse rapide…

… et une analyse correcte.

La propulsion à réaction

Pour se déplacer dans une piscine, le nageur prend appui sur l'eau : l'action de l'eau sur le nageur, opposée à celle du nageur sur l'eau, permet à celui-ci de se propulser. Sur le même principe, la fusée est propulsée par le gaz qu'elle éjecte. Pour expliquer ce mode de propulsion, appelé propulsion par réaction, le physicien utilise une grandeur adaptée : la quantité de mouvement.

Conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé

Soit un système de masse m ayant la vitesse $\vec{v}$ dans un référentiel galiléen. Si la somme des forces qu'il subit est nulle, la deuxième loi de Newton s'écrit

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0} \quad \text{où} \quad \vec{p} = m\vec{v} \text{ est la quantité de mouvement du système.}$$

Ainsi, la quantité de mouvement d'un système isolé est constante.
Si la masse du système est constante, sa vitesse l'est aussi : le mouvement du système est alors rectiligne et uniforme.
Si le système est composé de deux objets de masse m_1 et m_2, de vitesses respectives $\vec{v_1}$ et $\vec{v_2}$, alors la conservation de la quantité de mouvement s'écrit

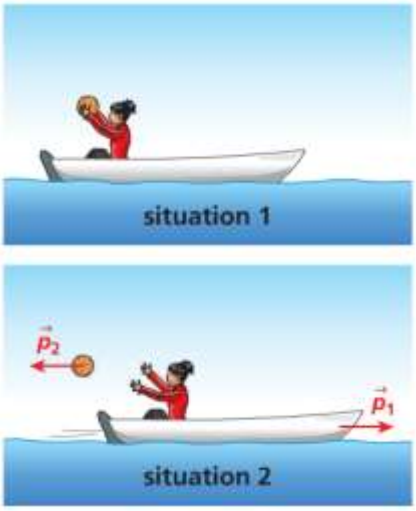
$$\vec{p} = m_1\vec{v_1} + m_1\vec{v_2} = \overrightarrow{cste}$$

Ceci permet d'expliquer la propulsion à réaction.

Situation 1 : le bateau est immobile. La quantité de mouvement du système {bateau + Leyla + ballon} est donc nulle dans le référentiel terrestre supposé galiléen. La somme des forces exercées sur ce système est nulle : le système est isolé.

Situation 2 : Leyla jette le ballon horizontalement vers l'arrière du bateau. Le ballon, de masse m_2, a une vitesse $\vec{v_2}$ dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Sa quantité de mouvement est donc $\vec{p_2} = m_2\vec{v_2}$, vecteur horizontal dirigé vers l'arrière. Les forces exercées sur le système {bateau + Leyla + ballon} n'ont pas changé : leur somme est toujours nulle, donc la quantité de mouvement totale de ce système n'a pas varié. Comme elle était nulle dans la situation 1, elle est toujours nulle.

Ainsi, le système {bateau + Leyla} a une quantité de mouvement $\vec{p_1} = -\vec{p_2}$, qui est horizontale et dirigée vers l'avant : le bateau, contenant Leyla, se met donc à avancer.



Propulsion des avions et fusées

La conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé permet d'expliquer la propulsion des avions à réaction au décollage.
Le système étudié est l'ensemble constitué de l'avion et des gaz éjectés. L'action de l'air sur l'avion est négligée (poussée d'Archimède comme frottements), les frottements dus au sol également.
L'avion ne subit que son poids et la réaction normale du sol.
La somme vectorielle de ces deux forces est nulle puisqu'elles sont verticales et que l'avion et les gaz éjectés n'ont qu'un mouvement vertical ; le système est dons isolé.
Sa quantité de mouvement, calculée dans le référentiel du sol, est donc constante, c'est-à-dire nulle puisqu'initialement le système est au repos.

Le principe de conservation permet donc d'écrire

$$\vec{p} = \vec{p}_{avion} + \vec{p}_{gaz} = m_{avion}\vec{v}_{avion} + m_{gaz}\vec{v}_{gaz} = \vec{0}$$

La vitesse des gaz étant dirigée vers l'arrière, celle de l'avion est dirigée vers l'avant.

Dans le cas d'une fusée juste après son décollage, la somme des forces extérieures n'est pas nulle : le système {fusée + gaz éjectés} est soumis à son seul poids $\vec{P}$.

La propulsion à réaction est possible si la vitesse des gaz éjectés et le débit d'éjection sont suffisamment élevés : les moteurs Vulcain équipant la fusée Ariane 5 éjectent au décollage 320 kg de gaz par seconde à une vitesse de 4 km.s^{-1}.

<u>Des exemples d'application</u>

Le téléphérique à ballon de baudruche

Soit t et t + Δt deux instants très proches lors du mouvement du ballon.

1. Représenter qualitativement la quantité de mouvement du système
   - {paille, ballon et air contenu à t dans le ballon}, assimilé à un point matériel situé au milieu de la paille
   - {air expulsé du ballon à la date t + Δt}
   - {paille, ballon et air contenu à t +Δt}
2. En considérant le système fermé (qui n'échange pas de matière avec l'extérieur) comme pseudo-isolé, indiquer comment évolue sa quantité de mouvement.

Généralisation

3. Soit un système pseudo-isolé composé d'un système ouvert et de la matière qui a été éjectée. Que vaut l'évolution de la quantité de mouvement du système
   - fermé, $\overrightarrow{p_f}(t+\Delta t)-\overrightarrow{p_f}(t)$?
   - ouvert, $\overrightarrow{p_o}(t+\Delta t)-\overrightarrow{p_o}(t)$?
4. Montrer que tout se passe comme si le système ouvert était soumis à une force et expliquer le principe de la propulsion à réaction.

Une balle est tirée par une arme à feu : quel effet cela produit-il sur l'arme ?

A un instant initial t avant le tir, le système fermé qui coïncide avec le système ouvert est l'arme et la balle dans le canon de l'arme.
A un instant ultérieur $t+\Delta t$, après le tir, le système fermé est constitué du système ouvert à $t+\Delta t$ (l'arme sans la balle) et de la matière éjectée pendant Δt (la balle).
La quantité de mouvement de la matière éjectée pendant Δt (la balle qui a été tirée) est dans la direction du canon, vers l'avant de l'arme ; ainsi, la force de poussée appliquée au système ouvert (l'arme) est dans la direction du canon, vers l'arrière : l'arme subit un recul lors du tir.

La grosse Bertha

La « grosse Bertha » est une très grosse pièce d'artillerie allemande utilisée lors de la Première Guerre mondiale. Elle doit son surnom à sa taille imposante et à ses 70 tonnes. Elle permettait d'envoyer un obus de mortier lourd à une distance de plus de 9 km. L'obus, de masse m = 700 kg, était propulsé à la vitesse de 400 m/s.

1. Que se passait-il pour la grosse Bertha lors du tir de l'un de ses obus ?
2. Quelle était alors la vitesse v' du canon après le tir ?
3. Que se serait-il passé sur l'on avait utilisé un canon de 10 tonnes avec les mêmes obus ?
4. Justifier la masse imposante de la grosse Bertha.

L'éternuement

Une encyclopédie en ligne propose la définition suivante : « l'éternuement désigne l'acte effectué violemment et bruyamment par le nez et la bouche correspondant à une expulsion d'origine réflexe de l'air contenu dans les poumons ».
La vitesse d'expulsion de l'air v est alors comprise entre 100 et 800 km/h ; un volume de l'ordre de V = 1,3 L d'air est expiré en Δt = 500 ms environ.

1. Déterminer après l'éternuement la composition du système fermé initialement composé de l'air dans les poumons.
2. En supposant que l'air est éjecté horizontalement, donner la norme et le sens de la quantité de mouvement de la matière éjectée pendant Δt.
3. Eternuer fait-il reculer ?

<u>Donnée</u> : 1 L d'air pèse un tout petit plus d'1 g.