Chapitre 5 : mouvement et forces

I) Description d'un système

a) Système mécanique

On nomme « système » le ou les objets dont on étudie le mouvement ou l'équilibre.

b) Centre de masse d'un système

Pour simplifier l'étude du mouvement d'un système, on le modélise par un point matériel, souvent le centre de masse.

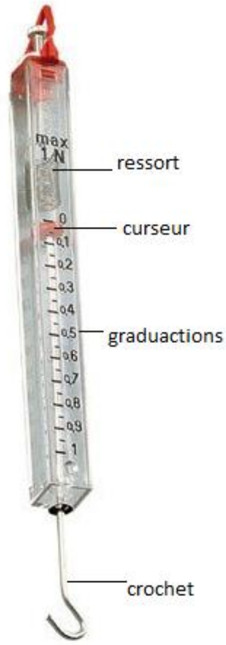
Le centre de gravité d'un marteau est décalée vers la tête

II) Système et interaction

a) Notion de force

> Définition : Une force est toute cause capable de déformer un corps ou de modifier son état de repos ou de mouvement.

On ne voit pas une force mais on observe ses effets. Parler de force ne veut rien dire. Il faut toujours préciser : « force exercée par A sur B noté $F_{A/B}$ »

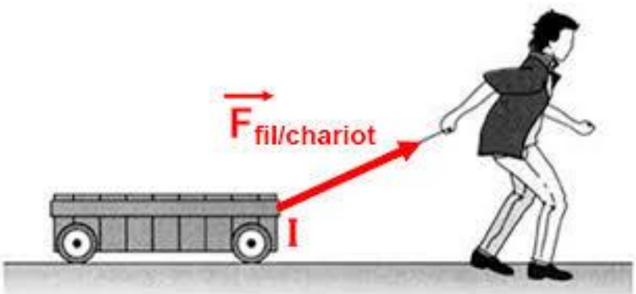


Effet des forces :

- *Déformer le système étudié*
- *Mettre en mouvement*
- *Modifier le mouvement (trajectoire /vitesse)*

Force = grandeur vectorielle

Une force est décrite par un vecteur car elle possède une direction, un sens, une intensité (= valeur en newton) et un point d'application. Elle se mesure avec un dynamomètre.

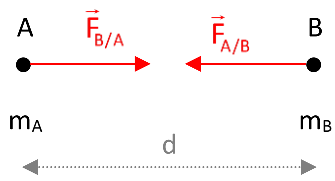


b) Principales forces rencontrées

Un solide soumis à aucune force est dit « **isolé** », un solide soumis à un ensemble de forces qui se compensent est dit « **pseudo-isolé** ».

❖ La force de gravitation

L'interaction gravitationnelle entre deux corps ponctuels, A et B, de masses respectives m_A et m_B, séparés d'une distance d, est modélisée par des forces d'attraction gravitationnelles, $\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$, dont les caractéristiques sont :



$$F_{A/B} = F_{B/A} = G\frac{m_A \times m_B}{d^2}$$

- m_A et m_B = masses respectives de A et B (en kg)
- G = 6,67.10^{-11} N.m^2.kg^{-2} (constante de gravitation)
- d = distance entre A et B (en m)
- $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$ (en N)

⇒ **$\vec{F}_{A/B}$ et $\vec{F}_{B/A}$ ont donc même direction, même valeur mais sont de sens opposé.**

❖ Le poids

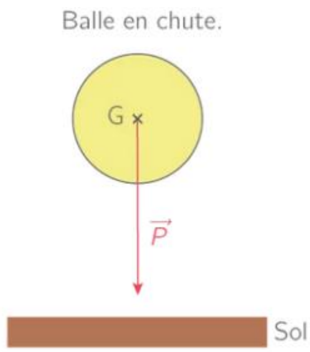
- On identifiera le poids $\vec{P}$ (vertical vers le centre de la Terre) d'un corps à la force d'attraction gravitationnelle $\vec{F}_{Terre/corps}$ exercée par la Terre sur ce corps :

$$\vec{P} = \vec{F}_{Terre/corps} = m \times \vec{g}$$

- **L'intensité de la pesanteur** terrestre dépend de la masse de l'astre et de la distance, **h** (altitude), entre le lieu considéré et le centre de l'astre :
-

$$g_T = G\frac{M_T}{(R_T + h)^2}$$ (h = 0 à la surface de la Terre)

⇒ **La valeur du poids d'un corps varie selon l'altitude du lieu où il se trouve**.



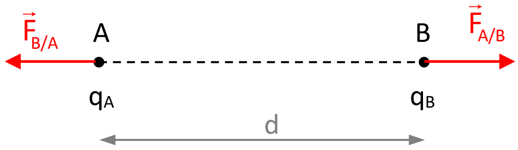
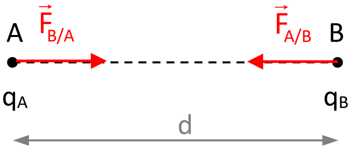
❖ Force de Coulomb

<u>Loi de Coulomb :</u> Deux charges électriques, **q_A** et **q_B**, exercent l'une sur l'autre des forces d'interaction électrostatique dont la valeur est proportionnelle à chacune des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance **d** qui les sépare.

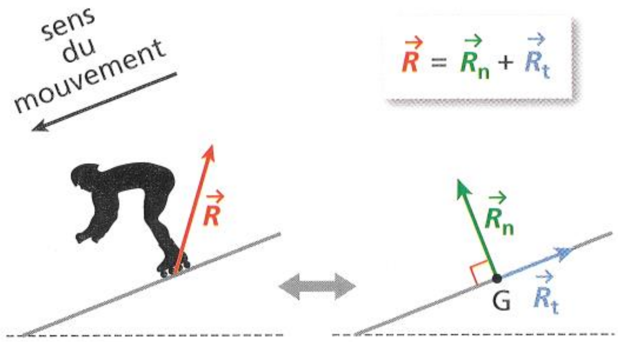
$$F_{A/B} = F_{B/A} = k \times \frac{|q_A| \times |q_B|}{d^2}$$

- q_A et q_B : charges (en C)
- $k = 9 \times 10^9$ N.m^2.C^{-2}
- d = distance entre q_A et q_B (en m)
- $F_{A/B}$ et $F_{B/A}$: intensités (en N)

Caractéristiques :

	Signe des charges q_A et q_B	Forces
	Même signe	• **Répulsives** • Même direction • Sens contraires • Même valeur ($F_{A/B} = F_{B/A}$)
	Signe contraire	• **Attractives** • Même direction • Sens contraires • Même valeur ($F_{A/B} = F_{B/A}$)

❖ Forces de contact entre solides

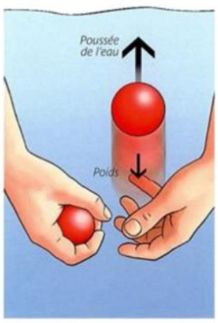


Lorsqu'un corps est posé sur un support, il subit une action mécanique de contact de la part de ce support modélisé par une force appelée « réaction du support » et notée $\vec{R}$.

Elle se décompose en une somme de deux forces :

- La **réaction normale** $\vec{R}_n$ traduisant le fait que le corps ne s'enfonce pas dans le support ;
- La **réaction tangentielle** $\vec{R}_T$, aussi appelée force de frottement solide, traduisant la résistance du support au mouvement du corps.

❖ Forces exercées par les fluides (liquide ou gaz)



- La **poussée d'Archimède**, notée $\vec{\Pi}$ (se lit pi) , verticale et orientée vers le haut.

  C'est la résultante des forces de pression exercé par le fluide sur le système.

Sa valeur est :

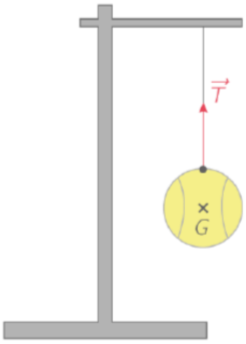
$$\Pi = \rho \times V \times g \qquad \begin{cases} \rho = \text{masse volumique du fluide (en g.L}^{-1}) \\ V = \text{volume occupé par le corps immergé (en L)} \\ g = \text{intensité de la pesanteur } (g = 9{,}81 \text{ m.s}^{-2}) \end{cases}$$

- La **force de frottement fluide**, notée $\vec{f}$, traduisant la résistance du fluide au mouvement du corps : c'est une force de contact qui s'opposent au déplacement de l'objet.

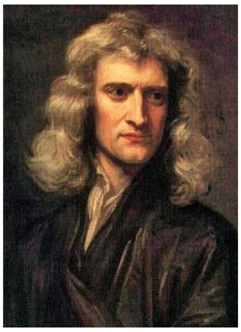
  Exemple : force de frottements de l'huile sur une bille en chute dans ce liquide.

❖ Tension d'un fil

Il s'agit d'une force exercée par un fil inextensible, on la note $\vec{T}$, sa direction est celle du fil et elle est orientée de l'extrémité en contact avec le système vers l'extrémité opposée du fil.



III) Les lois de Newton



Isaac Newton fut le premier à établir les relations entre mouvement d'un solide et forces qui lui sont appliquées.

1. La première loi de Newton

Cette loi est aussi connue sous la dénomination « **principe de l'inertie** »

Depuis Aristote, on pensait que pour maintenir la vitesse d'un mobile constante, il était nécessaire de lui appliquer une force. Galilée à la fin du XVI^{e} siècle, émit l'hypothèse contraire et Newton reformula cette idée.

Énoncé : dans un référentiel galiléen $\mathfrak{R}$, lorsqu'un solide est isolé ou pseudo-isolé, son centre d'inertie G est :

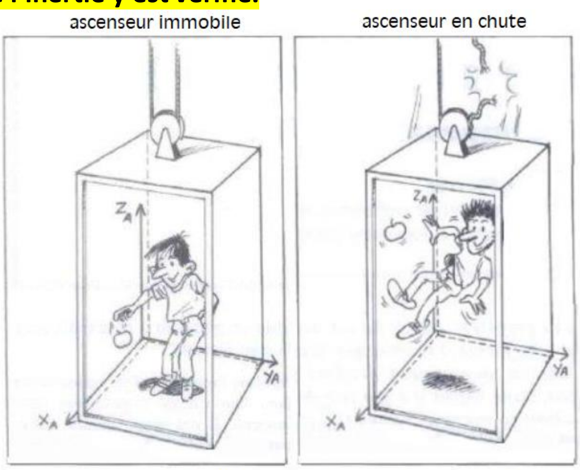
- soit au repos, si G est initialement **immobile** ;
- soit animé d'un mouvement **rectiligne uniforme**.

Si $\Delta\vec{v}_G = \vec{0}$ alors $\sum \vec{F}_{extérieures} = \vec{0}$ et réciproquement

- **Un référentiel est dit « galiléen » si le principe de l'inertie y est vérifié.**

Exemple : Dans l'ascenseur immobile (à gauche) la pomme lâchée tombe. Son mouvement n'est pas rectiligne uniforme car elle n'est pas soumise à des forces qui se compensent (il n'y a que le poids). Le principe de l'inertie est vérifié.

Dans l'ascenseur en chute libre, la pomme est immobile par rapport à l'ascenseur, pourtant elle n'est soumise qu'à une force (son poids). Donc les forces ne se compensent pas ! Le principe d'inertie n'est pas vérifié !
L'ascenseur en chute libre n'est pas un référentiel galiléen.



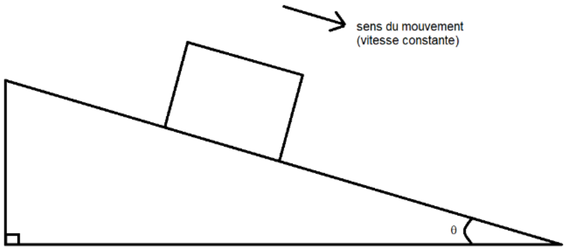
Référentiel galiléen et référentiel non galiléen

- **Méthode d'utilisation du principe de l'inertie**

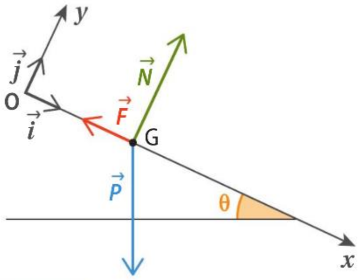
1) *Définir le système et le modéliser par un point (le centre de masse)*
2) *Définir le référentiel d'étude qui doit être supposé galiléen.*
3) *Faire le bilan des forces extérieurs appliquées au système*
4) *Ecrire l'expression vectorielle de la 1ère loi de Newton :* $\sum \vec{F} = \vec{0}$
5) *Projeter cette relation vectorielle sur les axes du repère pour obtenir une ou plusieurs équations qu'il faut résoudre en isolant la grandeur recherchée.*

Exemple :

Un bloc de 5 kg descend à vitesse constante une pente inclinée d'un angle de 25° avec l'horizontale. On donne le champ de pesanteur g=9,81 N/kg. Calculer la valeur de toutes les forces exercées sur le bloc.



1) **Système** : le bloc assimilé au point G.
2) **Référentiel** : terrestre supposé galiléen
3) **Bilan des forces** :
   - Poids du bloc P
   - Réaction normale du support N (perpendiculaire au sol vers le haut)
   - Réaction tangentielle au support F (=frottements) parallèle au plan incliné opposée au sens du mouvement

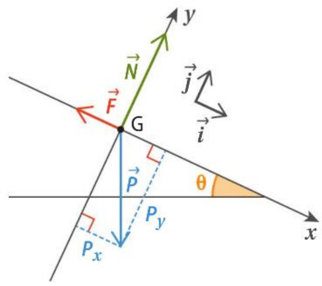


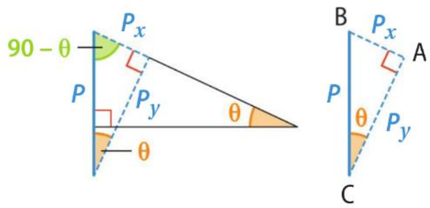
4) Vitesse constante donc mouvement rectiligne uniforme. En vertu du principe de l'inertie : *:*

$\sum \vec{F} = \vec{0}$ *soit* $\vec{\boldsymbol{P}} + \vec{\boldsymbol{N}} + \vec{\boldsymbol{F}} = \vec{\boldsymbol{0}}$

5) On **projette** ensuite chacune des forces dans le repère$(0, \vec{\imath}, \vec{\jmath})$

Pour N : $\vec{N} = 0 \cdot \vec{\imath} + N \cdot \vec{\jmath}$
Pour F : $\vec{F} = -F \cdot \vec{\imath} + 0 \cdot \vec{\jmath}$
Pour P : $\vec{P} = P \cdot \sin\theta \cdot \vec{\imath} - P \cdot \cos\theta \vec{\jmath}$





Calcul des coordonnées de la force $\vec{P}$ le long des axes (O*x*) et (O*y*). Selon les définitions de trigonométrie dans le triangle ABC, on peut écrire :

$$\cos\theta = \frac{|P_y|}{P} \quad \text{et} \quad \sin\theta = \frac{|P_x|}{P}$$

D'où : $P_x = P\sin\theta$ et $P_y = -P\cos\theta$.

Enfin, on écrit la première loi de Newton avec ces projections : $\vec{\boldsymbol{P}} + \vec{\boldsymbol{N}} + \vec{\boldsymbol{F}} = \vec{\boldsymbol{0}}$

Sur l'axe Ox : $R \sin\theta + 0 - F = 0$

Sur l'axe Oy : $-P \cdot \cos\theta + N + 0 = 0$

On a donc un système mathématique à résoudre d'inconnues N et F (P se calcule facilement P=mg)

$$\begin{cases} F = P \cdot \sin\theta = mg \sin\theta = 20{,}7N \\ N = P \cdot \cos\theta = mg\cos\theta = 44{,}5N \end{cases}$$ et P =mg =49 N

2. La deuxième loi de Newton

Cette loi est aussi connue sous la dénomination « **théorème du centre d'inertie** » ou « **principe fondamentale de la dynamique (PFD)** ». Elle établit le lien entre forces appliquées et nature du mouvement.

Énoncé : **dans un référentiel galiléen $\mathfrak{R}$, la somme des forces extérieures (ou résultante) qui s'exercent sur un système de masse m est égale au produit de sa masse par le vecteur accélération de son centre de masse :**

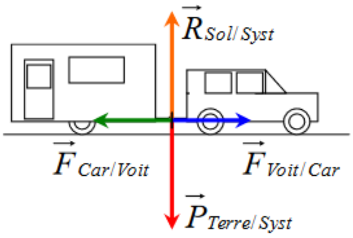
$$\sum \vec{F}_{extérieures} = m\,\vec{a}(t)$$ Si la masse est constante uniquement

NB : les forces « extérieures » sont les forces exercées par XXX sur le système étudié !

Exemple :

On considère le système {voiture + caravane} de la figure. Parmi les forces représentées, déterminer celles que l'on appelle des forces extérieures.

Ce sont R_{sol} et le poids uniquement !

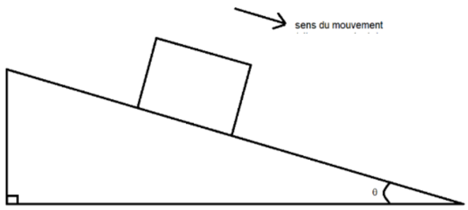


- **Méthode d'utilisation du principe fondamentale de la dynamique**

1) *Définir le système et le modéliser par un point (le centre de masse)*
2) *Définir le référentiel d'étude qui doit être supposé galiléen.*
3) *Faire le bilan des forces extérieurs appliquées au système*
4) *Ecrire l'expression vectorielle de la 2ème loi de Newton :* $\sum \vec{F} = m\vec{a}$
5) *Projeter cette relation vectorielle sur les axes du repère pour obtenir une ou plusieurs équations qu'il faut résoudre en isolant la grandeur recherchée. Utiliser les conditions initiales données dans l'énoncé pour déterminer les équations horaires de la vitesse et de la position.*

Exemple :

Un bloc de 5 kg descend le long d'une pente inclinée d'un angle de 25° avec l'horizontale. A l'instant t=0s, le bloc se situe à l'abscisse x=0m et est lâché sans vitesse initiale. On donne le champ de pesanteur g=9,81 N/kg. Etablir les équations horaires de la vitesse et de la position sachant qu'on néglige les frottements.

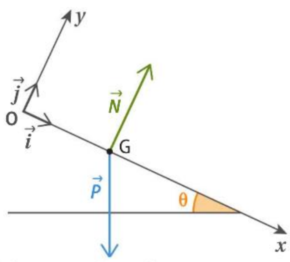


1) **Système** : le bloc assimilé au point G.
2) **Référentiel** : terrestre supposé galiléen
3) **Bilan des forces** :
   - Poids du bloc P
   - Réaction normale du support N (perpendiculaire au sol vers le haut)
4) PFD : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ soit $\vec{P} + \vec{N} = m\vec{a}$
5) On projette sur les axes Ox et Oy

   Pour N : $\vec{N} = 0 \cdot \vec{\imath} + N \cdot \vec{\jmath}$

   Pour P : $\vec{P} = P \cdot \sin\theta \cdot \vec{\imath} - P \cdot \cos\theta \cdot \vec{\jmath}$

   Enfin, on écrit la 2ème loi de Newton avec ces projections $\vec{P} + \vec{N} = m\vec{a}$



Bloc sur un plan incliné, représenté par un point G. Les forces de frottement sont négligées.

Sur Ox : $0 + P \cdot \sin\theta = m \cdot a_x$

Sur Oy : $N - P \cdot \cos\theta = m \cdot a_y$

Or le système est en mouvement sur Ox donc $a_y = 0$, il reste donc :

$mg \cdot \sin\theta = m \cdot a_x$ soit $a_x = g \sin\theta$

Par définition, $a_x = \frac{dv_x}{dt} = g \cdot \sin\theta$ où g et θ sont indépendants de t.

La primitive de cette accélération est de la forme $v_x(t) = g \sin\theta \cdot t + A$ avec A une constante réelle. On peut déterminer cette constant A à l'aide des conditions initiales sur la vitesse. L'énoncé stipule qu'on lâche le bloc sans vitesse initiale à t=0.

Donc v(t=0)=0 soit $v_x(t = 0) = g \sin\theta \times 0 + A = 0$ donc A= 0.

Il reste donc comme équation horaire de la vitesse : $v_x(t) = g \sin\theta \cdot t$

Or, par définition $v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt}$ donc la position x(t) est une primitive de la vitesse v_x.

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = g \sin\theta \cdot t$$

La primitive est $x(t) = g \sin\theta \frac{t^2}{2} + B$ avec B une constante réelle. On détermine cette constante B avec les conditions initales sur la position. D'après l'énoncé, à t=0s, le bloc est à l'abscisse x=0 donc x(t=0)=0 soit $x(t = 0) = g \sin\theta \frac{0}{2} + B = 0$ donc B=0.

Finalement, l'équation horaire de la position est $x(t) = g \sin\theta \frac{t^2}{2}$

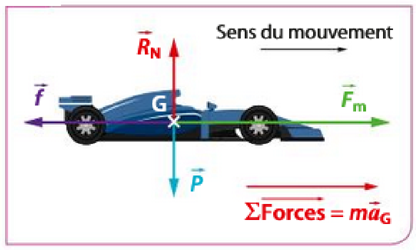
Autres exemples :

• Calcul de la valeur de la somme des forces pour un système en MRU

Une voiture de course de masse $m = 600$ kg passe de 0 à 100 km·h^{-1} (soit 27,8 m·s^{-1}) en $\Delta t = 2{,}5$ s en ligne droite.

1. Le **mouvement est rectiligne** et la vitesse augmente donc le vecteur accélération $\vec{a}_G$ est **colinéaire** et **de même sens** que le vecteur vitesse.
2. L'accélération moyenne est $\|\vec{a}_G\| = \left\|\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}\right\| = \frac{27{,}8 - 0}{25 - 0} = 11{,}1$ m·s^{-2}
3. Donc $\|\sum \vec{Forces}\| = 600 \times 11{,}1 = 6{,}7 \times 10^3$ N ce qui représente la différence entre la force de propulsion $\vec{F}_m$ et les frottements dus à l'air $\vec{f}$ ($\vec{P} + \vec{R}_N = \vec{0}$ sur l'axe vertical).
4. $\sum \vec{\textbf{Forces}}$ est dans le sens du mouvement et horizontal

Forces appliquées sur la voiture

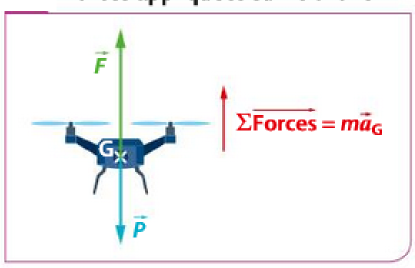


• Calcul de l'accélération $\vec{a}_G$

Un drone $m = 110$ g décolle verticalement, sa force de propulsion est $F = 1{,}3$ N ($g = 9{,}8$ N·kg^{-1}).

1. $\|\vec{a}_G\| = \frac{\|\sum \vec{Forces}\|}{m_{système}}$ avec $\sum \vec{Forces} = \vec{P} + \vec{F}$ vertical vers le haut.
2. En norme $\|\sum \vec{Forces}\| = F - P = 1{,}3 - 0{,}11 \times 9{,}8 = 0{,}22$ N
3. Donc $\|\vec{a}_G\| = \frac{F - P}{m} = 2{,}0$ m·s^{-2} avec $\vec{a}_G$ vertical vers le haut

Forces appliquées sur le drone



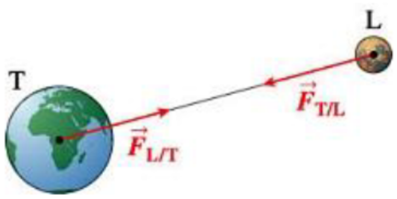
3. La troisième loi de Newton

Cette loi est aussi connue sous la dénomination « **principe de l'action et de la réaction** ».

Énoncé : lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique représentée par une force $\vec{F}_{A/B}$, le corps B exerce sur A une action mécanique représentée par une force $\vec{F}_{B/A}$. Ces deux forces ont même direction, même norme mais sont de sens contraire.

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$$

- Exemple :



La force exercée par la Terre sur la Lune a même direction et même intensité que la force exercée par la Lune sur la Terre.

$$F_{T/L} = F_{L/T} = G \cdot \frac{M_L \cdot M_T}{d_{T-L}{}^2}$$

Par contre ces deux forces sont de sens opposés.