Chapitre 4: Les 3 principes de Newton

1. Rappels sur les forces

Rappel 1 : On appelle force toute cause capable de:

- **modifier le mouvement** d'un corps;
- **modifier la forme** d'un corps.

Rappel 2 : Une force est une grandeur vectorielle.
Une force est donc représentée par son **vecteur** dont les caractéristiques sont :

- **direction** : droite d'action de la force = droite sur laquelle la force agit;
- **sens** : sens dans lequel la force agit;
- **norme** : intensité de la force;
- **point d'application** : point du corps auquel la force s'exerce.

Rappel 3 : L'effet d'une force ne change pas si l'on fait glisser la force sur sa droite d'action.

Rappel 4 : Une force est toujours exercée **par un corps sur un autre corps**, ou bien par une partie d'un corps sur une autre partie d'un corps. On distingue des forces de contact et des forces à distance. On distingue également des forces localisées et des forces réparties.

Exemples :

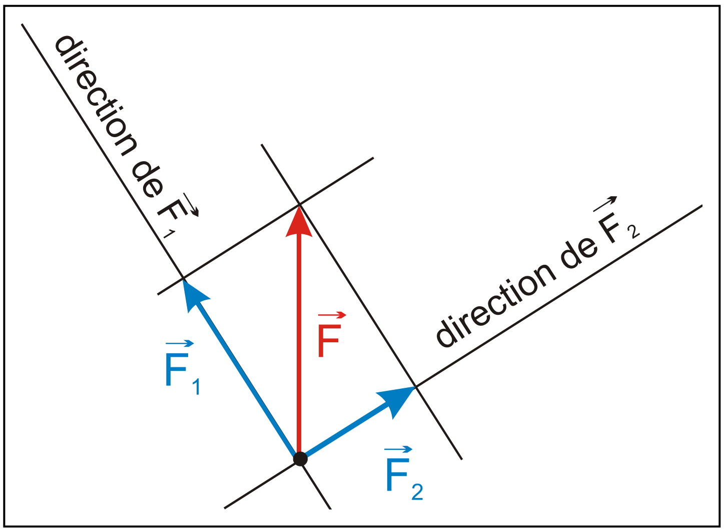
- **Forces de contact :** force de tension d'une corde, force de transmission d'une tige, force pressante d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz, force de frottement d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz.
- **Forces à distance :** poids (force de gravitation), force électrique, force magnétique.
- **Forces localisées :** force de tension d'un fil ou d'un ressort.
- **Forces réparties :** poids, forces pressantes, forces de frottement.

Une force n'est jamais exercée par un corps sur soi-même ! D'après le rappel 1, un corps ne peut donc pas se mettre soi-même en mouvement ou se déformer soi-même.

Rappel 5 : On appelle résultante $\vec{R}$ de plusieurs forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$,.., s'exerçant sur un corps, la force $\vec{R}$ qui, s'exerçant sur le même corps, a le même effet que les forces $\vec{F_1}$, $\vec{F_2}$, $\vec{F_3}$,.. ensembles. Elle est la somme vectorielle des différentes forces :

$$\boxed{\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + ... = \sum_i \vec{F}_i}$$

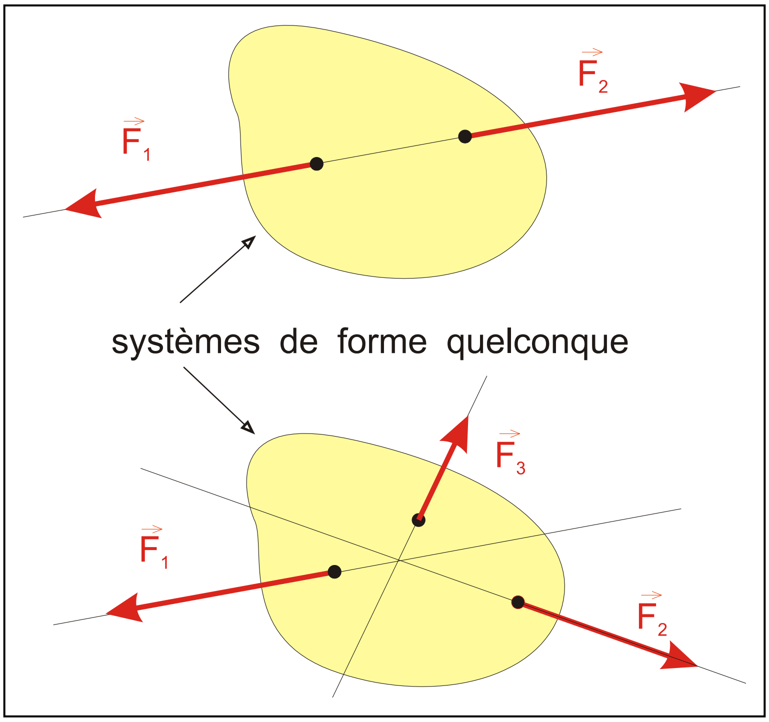
Rappel 6 : Une force $\vec{F}$ peut être décomposée en deux composantes $\overrightarrow{F_1}$et $\overrightarrow{F_2}$, dont les directions sont données. Les deux forces $\overrightarrow{F_1}$ et $\overrightarrow{F_2}$, ensembles ont alors le même effet que leur résultante$\vec{F}$: $\vec{F} = \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_2}$.



Rappel 7 : Un corps ponctuel est en équilibre (= au repos ou en MRU) si la résultante des forces s'exerçant **sur lui** est nulle : $\sum \vec{F} = \vec{0}$. Les forces se compensent mutuellement.

S'il n'y a que deux forces alors ces forces ont des directions confondues, des sens opposés et des intensités égales : $\sum \vec{F} = \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_2} = \vec{0} \quad \Leftrightarrow \quad \overrightarrow{F_1} = -\overrightarrow{F_2} \Rightarrow F_1 = F_2$

Dans le cas de 3 forces, en plus de la condition $\sum \vec{F} = \vec{0}$, les forces sont concourantes et coplanaires.



2. Rappel : énoncé du **principe d'inertie (1^er principe de Newton)**

Si un système n'est soumis à aucune force ou s'il est soumis à un ensemble de forces dont la résultante est nulle, alors le centre d'inertie G du système décrit un mouvement rectiligne et uniforme (MRU).

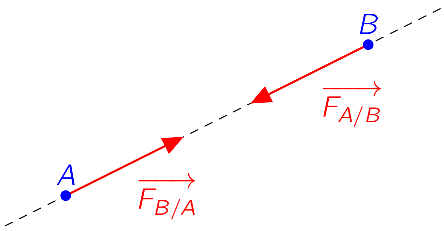
Remarques :

- Le principe englobe le cas particulier du repos qui peut être considéré comme un mouvement rectiligne uniforme avec vitesse nulle.
- Dans la réalité, un corps soumis à aucune force n'existe pas. Le principe d'inertie s'appliquera donc toujours à des systèmes où les forces se compensent mutuellement pour donner une résultante nulle.

3. Rappel *:* énoncé du **principe des actions réciproques (3^e principe de Newton ou principe de l'action et de la réaction)**

Si un corps A exerce une force $\overrightarrow{\mathbf{F}_{\mathbf{A/B}}}$ sur un corps B, alors le corps B exerce également une force $\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$ sur le corps A tel que $\overrightarrow{\mathbf{F}_{\mathbf{A/B}}} = -\overrightarrow{\mathbf{F}_{B/A}}$. On parle d'**interaction**.

Ces deux forces ont même direction, sens opposés, même intensité et apparaissent et disparaissent simultanément. On les appelle : action et réaction.



Exemples de forces réciproques :

- L'attraction de la Terre sur la Lune et celle de la Lune sur la Terre
- Force de propulsion du fusil sur la balle et force de la balle sur le fusil (recul du fusil)
- La force de traction d'une voiture sur sa remorque et la force de freinage de la remorque sur la voiture
- La force exercée par les pieds d'une personne sur le sol et celle du sol exercée sur les pieds (réaction du sol)
- La force de frottement exercée par la route sur les pneus d'une voiture et la force de frottement des pneus sur la route (discuter l'effet de ces forces lors du freinage et lors du démarrage de la voiture)

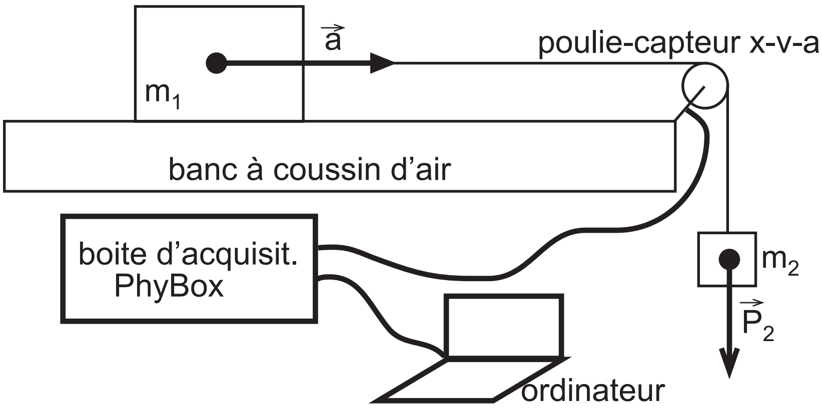
Que penser de l'affirmation « il est impossible de créer une seule force » ? En fait, dès qu'une force survient, sa force réciproque survient en même temps !

4. Le principe fondamental de la dynamique (2^e principe de Newton). Etude expérimentale

a) Dispositif expérimental

On étudie dans le **référentiel** terrestre, le **système** composé d'un chariot de masse m_1 et d'un corps tombant en chute libre de masse m_2 qui est accéléré sous l'action de la seule **force extérieure** constante : $\vec{F} = \vec{P}_2 = m_2 \cdot \vec{g}$.

(Les frottements peuvent être négligés et le poids du chariot est compensé par la réaction du banc.)



L'axe Ox du **repère** cartésien correspond à la direction du rail et est orienté dans sens du mouvement.

Le système de masse totale $m = m_1 + m_2$ prend donc une accélération $\vec{a}$, qu'il s'agit de déterminer.

Le fil reliant le chariot au corps tombant fait tourner une poulie qui est un capteur capable de déterminer le temps de parcours et la distance parcourue en d'en déduire la vitesse de parcours du fil ainsi que l'accélération du système. Les grandeurs ainsi captées sont envoyées à une boîte d'acquisition (PhyBox) qui permet de les visualiser à l'aide d'un logiciel (PhyMex).

b) Mesures

1) ***m reste constant :*** La masse du système est maintenue constante. Nous déterminons l'intensité a de l'accélération $\vec{a}$ pour plusieurs valeurs différentes de l'intensité F de la force $\vec{F}$.

m_2 en kg	$F=m_2 \cdot g$ en N	a en m/s^2	F/a en $N \cdot s^2/m$

Pour une masse m du système, maintenue constante, l'intensité a de l'accélération prise par le mobile est proportionnelle à l'intensité F de la force accélératrice:

$$a \sim F \qquad \text{pour } m = \text{constante} .$$

2) ***F reste constante :*** La force accélératrice est maintenue constante. Nous déterminons l'intensité a de l'accélération pour plusieurs masses m_1 du chariot différentes, donc pour des masses m différentes.

m en kg	a en m/s^2	$m \cdot a$ en $kg \cdot m/s^2$

Pour une force accélératrice constante, l'intensité a de l'accélération prise par le mobile est inversement proportionnelle à sa masse m:

$$a \sim \frac{1}{m} \qquad \text{pour } F = \text{constante} .$$

d) Conclusion

On a donc ***:***

$$a \sim F \quad \text{pour } m = \text{constante}$$

et

$$a \sim \frac{1}{m} \quad \text{pour } F = \text{constante}$$

Ainsi : $a \sim \frac{F}{m}$

ou bien : $F \sim m \cdot a$

On obtient : $F = k \cdot m \cdot a$

où k = facteur de proportionnalité constant.

e) Unité S.I. : le newton (N)

Les unités kg, m et s (= unités qui interviennent dans celles de la masse et de l'accélération) sont définies depuis le 20 mai 2019 en se basant sur les constantes physiques de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé $\Delta\nu_{Cs}$, la vitesse de la lumière dans le vide c et la constante de Planck h.

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{Cs}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz (hertz), unité égale à s^{-1}.
Il résulte de cette définition que la seconde est égale à la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de césium-133 non perturbé.

Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c, égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en $m\ s^{-1}$, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs}$.
Il résulte de cette définition que le mètre est la longueur du trajet parcourue dans le vide par la lumière pendant une durée de temps de 1/299 792 458 de seconde.

Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h, égale à $6{,}626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $kg\ m^2\ s^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{Cs}$.

En établissant le Système International d'unités, les physiciens ont convenu de donner à la constante k une valeur égale à 1, ce qui définit l'unité pour la force : $1N = 1\ kg\ m/s^2$

1 newton : 1N = l'intensité de la force qui appliquée à un corps de masse 1 kg, provoque chez ce corps une accélération de 1 m/s^2.

Ou bien :

1 newton : 1N = l'intensité de la force qui appliquée à un corps de masse 1 kg, provoque chez ce corps une variation de la vitesse de 1 m/s chaque seconde.

f) Force et quantité de mouvement

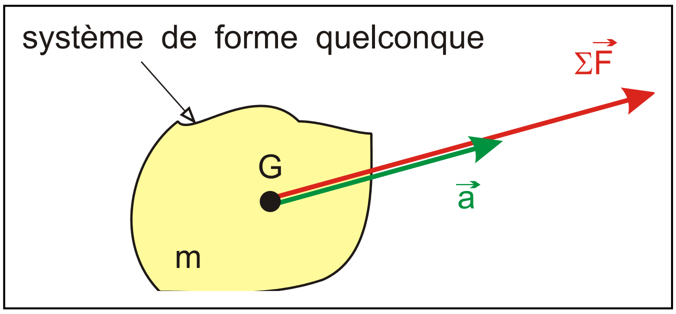
Or a: $$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{m\vec{v}_f - m\vec{v}_i}{\Delta t} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

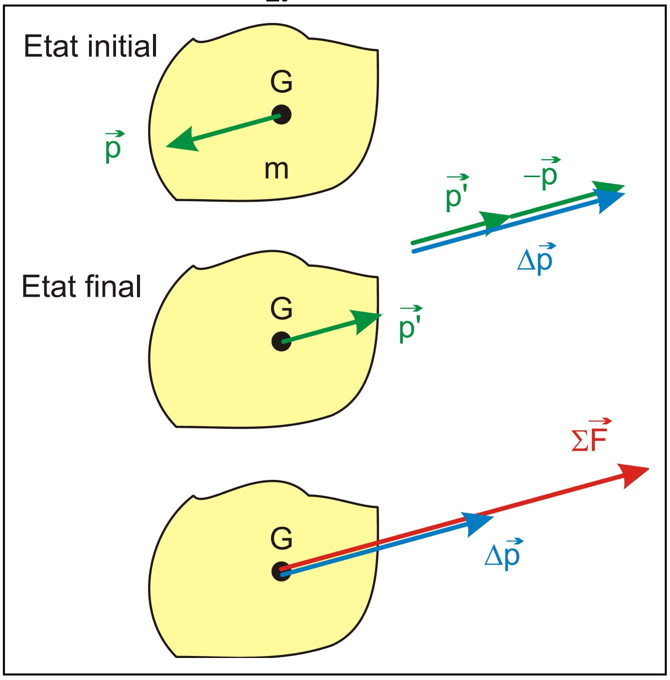
La force est égale à la variation de la quantité de mouvement par seconde.

5. Le principe fondamental (2e principe de Newton). Enoncé et applications

a) Enoncé et relation vectorielle

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \qquad \text{ou bien} \qquad \sum \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$





Si un système de masse totale m est soumis à des forces extérieures de résultante $\sum \vec{F}$ alors le centre d'inertie G du système a une accélération $\vec{a}$, tel que : $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$

Ou bien :

Si, au cours d'une durée Δt, un système est soumis à des forces extérieures de résultante $\sum \vec{F}$, alors sa quantité de mouvement varie de $\Delta \vec{p}$, tel que : $\sum \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$

Remarque importante : Le principe se lit aussi dans l'autre sens :

Si un système de masse totale m subit une accélération $\vec{a}$, alors il est soumis à des forces extérieures de résultante $\sum \vec{F}$, tel que : $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$

Ou bien :

Si, au cours d'une durée Δt, un système subit une variation de la quantité de mouvement de $\Delta \vec{p}$, alors il est soumis à des forces extérieures de résultante $\sum \vec{F}$, tel que : $\sum \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$

b) Remarque **:** forces extérieures, forces intérieures

Une force extérieure est une force exercée sur le système par un corps qui ne fait pas partie du système.

Une force intérieure est une force exercée par une partie du système sur une autre partie du système.

c) Normes. Coordonnées

La norme de la résultante est reliée à la norme de l'accélération par la relation : $\left\|\sum \vec{F}\right\| = m\cdot a$

- Si on n'a qu'une seule force $\vec{F}$, $\left\|\sum \vec{F}\right\| = F$, on a $\boxed{F = ma}$
- Si on a plusieurs forces, $\left\|\sum \vec{F}\right\|$ (norme de la somme des vecteurs) est en général différent de $\sum F$ (somme des normes des vecteurs) !
  Dans ce cas, on projette les vecteurs $\sum \vec{F}$ et $\vec{a}$ sur les axes Ox et Oy du repère et on applique les relations entre les coordonnées des vecteurs.

$$\boxed{\sum F_x = ma_x, \quad \sum F_y = ma_y}$$

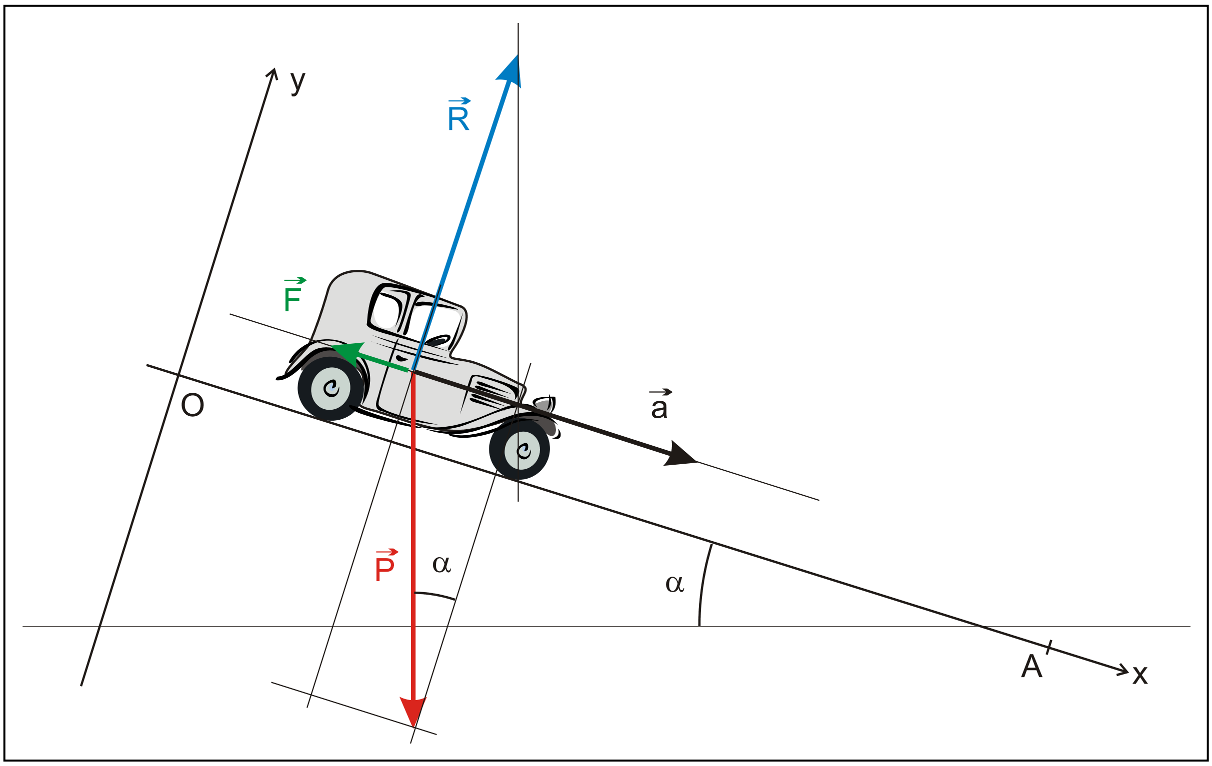
d) Exemple 1: accélération d'une voiture

Une voiture, de masse 1 t, se trouve initialement au repos en haut d'une route de pente de 5% (5m de descente pour 100 m de parcours réel), longue de 200 m. Le chauffeur lâche le frein à main et débraye. Le frottement de la route vaut 100 N, la résistance de l'air 50 N. Déterminer la durée de la descente.

Solution :

* Système étudié : voiture de masse m
* Référentiel : route (terrestre)
* Repère : cartésien Oxy indiqué sur la figure
* Forces extérieures : poids $\vec{P}$, réaction de la route $\vec{R}$, force totale de frottement totale $\vec{F}$
* Principe fondamental : $\sum \vec{F} = m\cdot\vec{a}$
* Projection sur les axes : $\sum F_x = ma_x \Leftrightarrow P\sin\alpha - F = ma_x$

$$\sum F_y = ma_y \Leftrightarrow R - P\cos\alpha = ma_y$$



Exploitation des équations :

Le mouvement est rectiligne, le long de l'axe Ox. Donc $a_y = 0$. On en déduit R si nécessaire !

L'accélération est parallèle à Ox et orientée dans le sens de Ox (sinon la voiture ne se mettrait pas en mouvement).

$$a_x = \frac{P\sin\alpha - F}{m} = \frac{mg\sin\alpha - F}{m} = g\sin\alpha - \frac{F}{m}$$

Comme $a_y = 0$ et $a_x > 0$, $a = a_x$! (Norme de $\vec{a}$ = coordonnée selon Ox de $\vec{a}$)

L'accélération $\vec{a}$ est constante au cours du temps : le mouvement est rectiligne et uniformément varié (MRUV) !

Supposons qu'à t = 0, la voiture se trouve à l'origine de l'axe Ox, et commence à descendre la route. A l'arrivée x = 200 m.

Déterminons la durée de la descente :

Relation entre x et t pour le MRUV : $x = \frac{1}{2}a_x t^2 + v_{0x} t + x_0$

$$v_{ox} = 0 : \quad x = \frac{1}{2}a_x t^2 \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2x}{a_x}}$$

Application numérique : $\sin\alpha = 0,05$; $a_x = 0,34$ m/s^2 ; t = 34,3 s.

La méthode appliquée dans cet exercice est générale ! On l'appliquera dans les exercices, sauf cas triviaux.

e) Exemple 2: accélération d'un corps en chute libre

La seule force s'exerçant sur un corps en chute libre est le poids $\vec{P} = m\vec{g}$

$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ se réduit à $m\vec{g} = m\vec{a} \;\Rightarrow\; \vec{a} = \vec{g}$

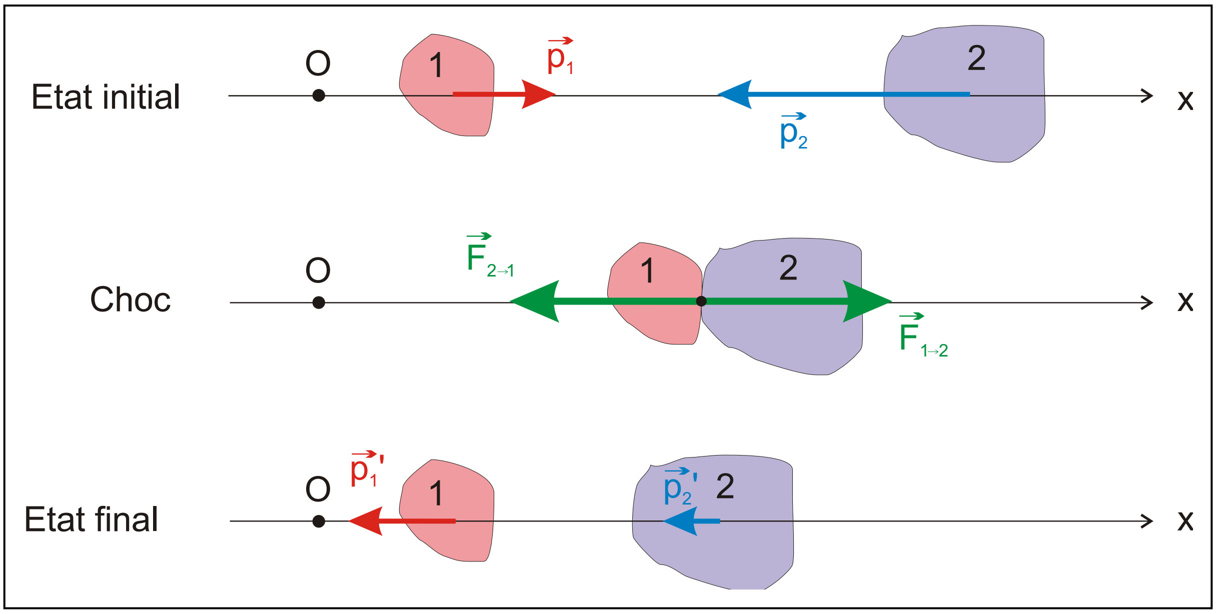
Conclusion : L'accélération d'un corps en chute libre est égale à $\vec{g}$!

En l'absence de frottement, tous les corps ont même mouvement de chute libre, indépendamment de leur masse et de leur forme !

f) Exemple 3 : Choc de deux corps

Considérons le choc d'un corps 1 de masse m_1 avec un corps 2 de masse m_2. L'étude est faite dans le référentiel terreste. Le rèpere cartésien Ox est définie sur la figure. Le système formé par les 2 corps est **pseudo-isolé** car les forces extérieures se compensent. Pour simplifier nous admettrons que les forces d'interaction internes (force du corps 1 sur le corps 2 : $\overrightarrow{F_{2\to1}}$ et celle du corps 2 sur le corps 1 : $\overrightarrow{F_{1\to2}}$) sont constantes durant la durée Δt de contact.

Les quantités de mouvement des 2 corps avant et après le choc sont indiquées sur la figure schématique.



Appliquons le principe fondamental pour chacun des 2 corps !

Corps 1 : $\overrightarrow{F_{2\to1}} = \frac{\Delta\vec{p_1}}{\Delta t} = \frac{\vec{p_1}' - \vec{p_1}}{\Delta t}$ (1)

Corps 2 : $\overrightarrow{F_{1\to2}} = \frac{\Delta\vec{p_2}}{\Delta t} = \frac{\vec{p_2}' - \vec{p_2}}{\Delta t}$ (2)

Appliquons le principe fondamental pour le système des 2 corps !

$\sum \vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{0} \Rightarrow \Delta\vec{p} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{p}$ est conservé (principe d'inertie)

Or : $\Delta\vec{p} = \Delta\vec{p_1} + \Delta\vec{p_2} = \vec{0} \Leftrightarrow \Delta\vec{p_1} = -\Delta\vec{p_2}$ (3)

(1), (2) et (3) $\Rightarrow \overrightarrow{F_{2\to1}} = -\overrightarrow{F_{1\to2}}$ (principe des actions réciproques)

Application numérique : $p_1 = 1$ kg m/s ; $p_2 = 3{,}5$ kg m/s ; $F_{1\to2} = 200$ N ; $\Delta t = 0{,}015$ s.

Calculer p'_1 et p'_2 !

Solution :

Projetons (1) sur l'axe Ox :

$$F_{2\to1x} = \frac{\Delta p_{1x}}{\Delta t} = \frac{p'_{1x} - p_{1x}}{\Delta t} \Leftrightarrow p'_{1x} = p_{1x} + F_{2\to1x}\cdot\Delta t = (1 - 200\cdot 0{,}015)\frac{\text{kgm}}{\text{s}} = -2{,}0\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$$

Projetons (2) sur l'axe Ox :

$$F_{1\to2x} = \frac{\Delta p_{2x}}{\Delta t} = \frac{p'_{2x} - p_{2x}}{\Delta t} \Leftrightarrow p'_{2x} = p_{2x} + F_{1\to2x}\cdot\Delta t = (-3{,}5 + 200\cdot 0{,}015)\frac{\text{kgm}}{\text{s}} = -0{,}5\frac{\text{kgm}}{\text{s}}$$

g) Remarques importantes

1. Le principe d'inertie et le principe des actions réciproques se déduisent du principe fondamental.
   - Si la résultante de toutes les forces sur un corps est nulle (système pseudo-isolé), alors : $\sum \vec{F} = m\cdot\vec{a} = \vec{0} \Rightarrow \vec{a} = \vec{0}$ et $\vec{p}$ est conservé $\Leftrightarrow \vec{v_G}$ est conservé (la masse ne changeant pas)
     Le centre d'inertie G du système décrit un mouvement rectiligne uniforme
     $\Leftrightarrow$ La quantité de mouvement du système est conservée.
   - Pour un système pseudo-isolé constitué de deux corps en interaction,
     $\sum \vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{0} \Rightarrow \Delta\vec{p} = \vec{0} \Leftrightarrow \Delta\vec{p_1} + \Delta\vec{p_2} = \vec{0} \Leftrightarrow \Delta\vec{p_1} = -\Delta\vec{p_2} \Leftrightarrow \frac{\Delta\vec{p_1}}{\Delta t} = -\frac{\Delta\vec{p_2}}{\Delta t}$
     $\Leftrightarrow \overrightarrow{F_{2\to1}} = -\overrightarrow{F_{1\to2}}$

     La force exercée par le corps 1 sur le corps 2 est de même direction, de même norme et de sens opposée que la force exercée par le corps 2 sur le corps 1 $\Leftrightarrow$ Si un corps 1 exerce une force sur un corps 2, alors le corps 2 exerce aussi une force sur le corps 1, de même norme, de même direction mais de sens contraire.
2. Il est absolument nécessaire de préciser le système considéré !

6. Interprétation de la masse : inertie

Le principe fondamental met en évidence que :

Plus la **masse** d'un système est élevée, plus l'accélération prise par le système est petite, c'est-à-dire, plus le système a des difficultés à modifier son mouvement, c'est-à-dire, plus l'**inertie** du système est importante.

L'inertie d'un système est une propriété que possède le système, **parce qu'il possède une masse**, de résister aux modifications de mouvement, de conserver son mouvement en ligne droite et à vitesse constante si aucune force n'agit.

> La masse est une mesure de l'**inertie** (= opposition au changement de mouvement) du système !

L'inertie du système ne dépend pas du poids mais uniquement de la masse. En effet, quelque part dans l'univers où le poids est nul, l'inertie d'un système est la même que sur la Terre !

Pourquoi confond-on souvent masse et poids ?

Parce qu'en un même lieu, le poids et la masse d'un corps sont proportionnels.

Effet d'inertie lorsque la vitesse varie (en direction et en norme)

Tout le monde sait qu'on est déporté vers la droite debout dans un bus en train de prendre un virage vers la gauche.

Ce phénomène n'est pas dû à une « mystérieuse force centrifuge », mais est une manifestation de l'inertie !

En fait, tout corps a tendance à poursuivre son mouvement en ligne droite à vitesse constante. Pour vous permettre de prendre, à l'intérieur du bus, votre virage vers la gauche, la résultante de toutes les forces extérieures vous tire vers la gauche. Pour cela vous devez vous tenir aux barres et aux mains courantes, qui, ensemble avec votre poids et la réaction du plancher sur vos chaussures, vous tireront vers la gauche. Ceci vous procure la sensation « d'être soumis à une force qui vous tire vers la droite, c. à d., vers l'extérieur du virage ».

Les non-scientifiques évoquent souvent la notion de « force centrifuge ». Or, celle-ci en tant que force exercée par un corps sur un autre corps, n'existe tout simplement pas ! (Qui l'exercerait ? Quelle serait sa force réciproque ?) On parle d'un effet centrifuge, ou mieux encore **d'un effet d'inertie**.

De même, il n'y a pas de force s'exerçant sur vous, lorsque vous êtes projetés vers l'avant dans un bus freinant vigoureusement, ou bien lorsque vous êtes pressés contre le siège dans un avion en train d'accélérer sur la piste d'envol. Ces manifestations sont également **des effets d'inertie**.

Exercices supplémentaires

1. Calculer la force motrice nécessaire pour accélérer en 30 s un avion de masse 10 t à partir du repos jusqu'à la vitesse de 216 km/h. Tenir compte d'une résistance de l'air moyenne de 1000 N ! *(F=21kN)*

2. Une voiture de masse 1 t est garée en haut d'une côte faisant un angle de 10° avec l'horizontale. Soudain le frein à main cède et la voiture commence à descendre la côte. On néglige les frottements dus au sol et à l'air.

a) Faire le bilan et un schéma des forces extérieures appliquées à la voiture.

b) Calculer l'accélération de la voiture. *($a=1{,}70\ m/s^2$)*

c) Quelle est la vitesse de la voiture après 10 m ? *($v=5{,}84\ m/s$)*

Reprendre l'exercice en tenant compte de la force de frottement (sol + air) dont l'intensité vaut 500 N. *($a=1{,}20\ m/s^2$, $v=4{,}91\ m/s$)*

3. Comment est-il possible qu'un moustique puisse battre des ailes plus de 1000 fois par seconde alors que vous-même ne pouvez effectuer qu'à peine deux aller-retour avec votre bras pendant le même temps bien que vous soyez beaucoup plus fort ?

4. Une voiture de masse 800 kg monte à une vitesse constante de 60 km/h une côte de 10 % (dénivellation 10 m pour 100 m de parcours). La force de frottement est constante et égale à 500 N.

a) Faire le bilan et un schéma des forces extérieures appliquées à la voiture.

b) Calculer l'intensité de la force motrice. *(F=1,29 kN)*

c) Le chauffeur retire son pied de la pédale de vitesse. Calculer l'accélération de la voiture. Après combien de mètres la voiture va-t-elle s'arrêter ? *($a=1{,}61\ m/s^2$, $\Delta x = 86{,}5m$)*