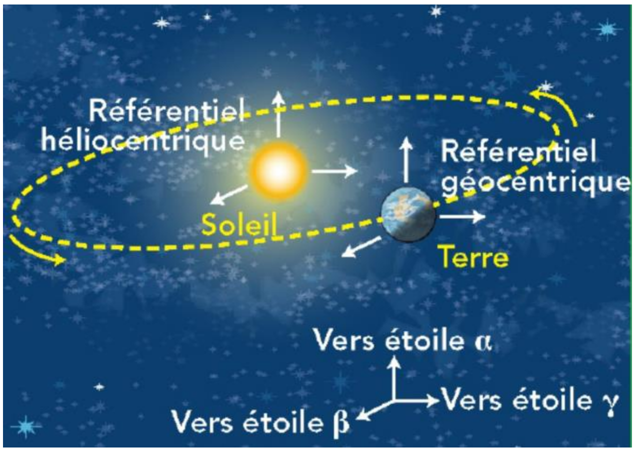
LOIS DE NEWTON

1- Référentiels galiléens

Pour simplifier l'étude du mouvement d'un système, il faut utiliser un référentiel adapté.



Un référentiel dans lequel les lois de Newton sont vérifiées est dit galiléen.

Pour l'étude de mouvement simples et de courtes durées, on supposera que les référentiels terrestre, géocentrique et héliocentrique peuvent être considérés comme étant galiléens.

Le référentiel Héliocentrique (solide formé par les centres, non coplanaires, du soleil et de trois autres étoiles) peut être considéré comme étant Galiléen pour étudier le mouvement des planètes autour du Soleil.

Le référentiel Géocentrique (solide formé par les centres, non coplanaires, de la Terre et de trois étoiles) est considéré comme étant Galiléen pour étudier le mouvement des satellites terrestres.

Le référentiel terrestre (référentiel du laboratoire, solide Terre) peut être considéré comme étant Galiléen pour les expériences dont la durée est courte par rapport au jour sidéral, ce qui est le cas de la plupart des expériences de mécanique réalisées sur Terre.

Tous les référentiels en mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à un référentiel Galiléen sont eux-mêmes Galiléens.

2- Première loi de Newton - Principe d'inertie

Un référentiel Galiléen est un référentiel dans lequel le principe de l'inertie est vérifié.

Dans un référentiel galiléen, si un système n'est soumis à aucune force (système isolé) ou si la somme des forces extérieures qui s'exercent sur lui est nulle (système pseudo-isolé), alors son centre d'inertie est immobile ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme, et réciproquement:

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0} \quad \Leftrightarrow \quad \overrightarrow{V_G} = \overrightarrow{Cte}$$

On peut énoncer ce principe de multiples façons:

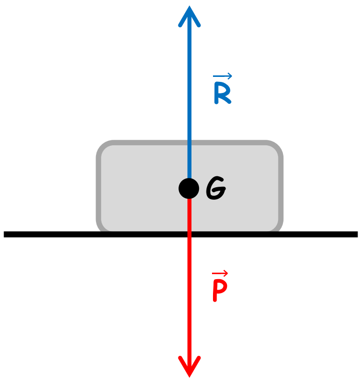
- Dans un référentiel Galiléen, si la somme $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ des forces extérieures appliquées à un solide est nulle alors le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_G}$ du centre d'inertie de ce solide ne varie pas.
- Dans un référentiel Galiléen, si la somme des forces extérieures $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ appliquées à un solide est nulle alors le centre d'inertie de ce solide est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme.
- Dans un référentiel Galiléen, si le vecteur vitesse $\overrightarrow{V_G}$ du centre d'inertie d'un solide ne varie pas alors la somme des forces extérieures $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ appliquées au solide est nulle.
- Si, dans un référentiel Galiléen, le centre d'inertie d'un solide est soit au repos, soit en mouvement rectiligne uniforme, alors la somme vectorielle des forces extérieures $\sum \overrightarrow{F_{ext}}$ appliquées à ce solide est nulle.

Contrairement à ce que croyaient les anciens, un solide peut donc se déplacer bien que la somme des forces appliquées à ce solide soit nulle. La véritable opposition n'est pas entre mouvement et repos mais entre mouvement rectiligne uniforme (le repos n'est qu'un cas particulier) et les autres types de mouvement. C'est un des mérites de Newton d'avoir bien compris cela.

Considérons le mouvement du centre d'inertie d'un solide pseudo-isolé dans un référentiel Galiléen (le référentiel spatial solide Terre) et lançons sur une table à coussin d'air horizontale un palet autoporteur muni d'un éclateur axial.

Les frottements étant nuls, les deux seules forces agissant sur le palet sont:

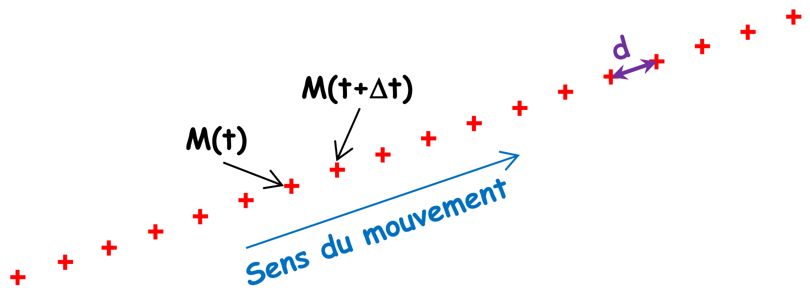
- Le poids $\vec{P}$ (essentiellement action gravitationnelle de la Terre sur le mobile).
- La force de réaction $\vec{R}$ (action verticale de la table sur le mobile).



En l'absence de frottement, la somme des forces agissant sur le mobile est nulle:

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$$

L'éclateur laisse sur le papier une trace concrétisant la trajectoire du centre d'inertie, située juste au-dessus de l'éclateur.



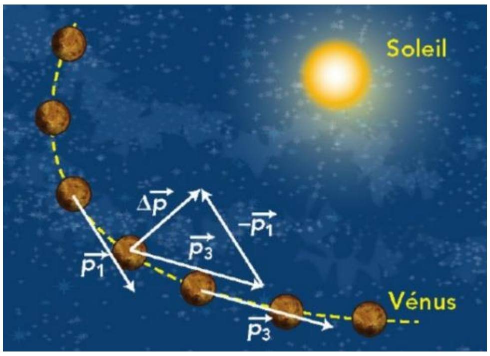
La distance **d = M(t)M(t+Δt)** parcourue pendant des intervalles de temps **Δt** identiques reste constante: le mouvement est rectiligne uniforme.

Remarque: Lorsqu'un système est isolé ou pseudo-isolé, sa vitesse est constante.

3- Seconde loi de Newton - Accélération (hors programme)

Il est facile de constater, dans le référentiel terrestre supposé Galiléen, qu'une force peut ralentir ou accélérer le mouvement d'un solide.

La direction de la vitesse de Vénus varie au cours du temps. Il en résulte donc que sa quantité de mouvement varie aussi. Cela s'explique par la seconde loi de Newton.



La deuxième loi de Newton est précisée grâce à l'introduction du vecteur quantité de mouvement $\vec{p}=m.\vec{v}$ du centre d'inertie du solide étudié.

Dans un référentiel Galiléen, la somme $\sum\overrightarrow{F_{ext}}$ des forces extérieures s'appliquant sur un système à l'instant t est égale à la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement $\vec{p}=m.\vec{v}$ du centre d'inertie G de ce système à cet instant.

$$\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Si le système conserve une masse constante au cours du temps, cette loi peut également s'écrire:

$$\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m.\frac{d\vec{v}}{dt} = m.\overrightarrow{a_G}$$

Dans un repère orthonormé $(O;\vec{i},\ \vec{j})$, le vecteur quantité de mouvement $\vec{p}=m.\vec{v}$ s'exprime par ses coordonnées:

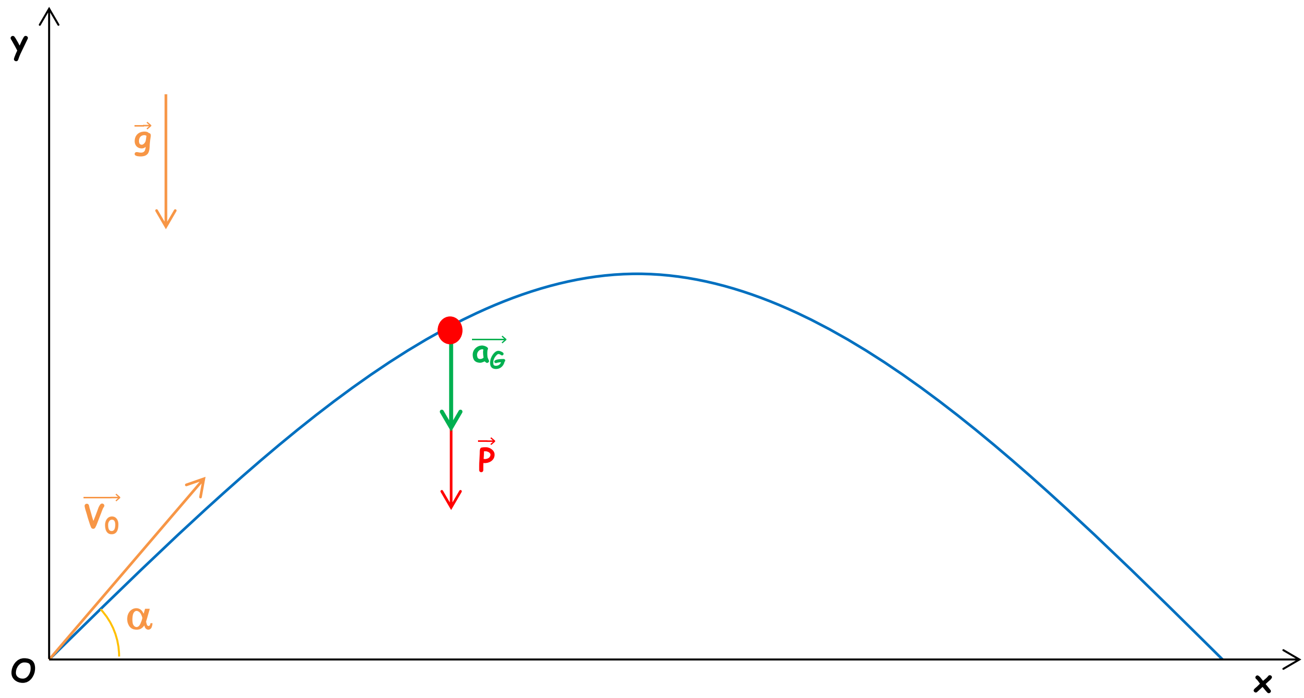
$$\vec{p} = p_x.\vec{i} + p_y.\vec{j}$$

et la seconde loi de Newton permet d'écrire:

$$F_x = \frac{dp_x}{dt} \quad \text{et} \quad F_{xy} = \frac{dp_y}{dt}$$

F_x et F_y sont les coordonnées de la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le système.

Lorsqu'on lance une balle dans un plan vertical avec une vitesse initiale $\overrightarrow{V_0}$ faisant un angle α avec l'horizontal, elle est soumise à son poids $\vec{P}$, à la poussée d'Archimède $\overrightarrow{\Pi_A}$ et à des forces de frottement $\vec{f}$.



On aura alors:

$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{P} + \overrightarrow{\Pi_A} + \vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m.\overrightarrow{a_G}$$

Dans le cas où on néglige la poussée d'Archimède $\overrightarrow{\Pi_A}$ et les forces de frottement $\vec{f}$ par rapport au poids $\vec{P}$, le vecteur accélération $\overrightarrow{a_G}$ du centre d'inertie G correspond à l'accélération de la pesanteur $\vec{g}$:

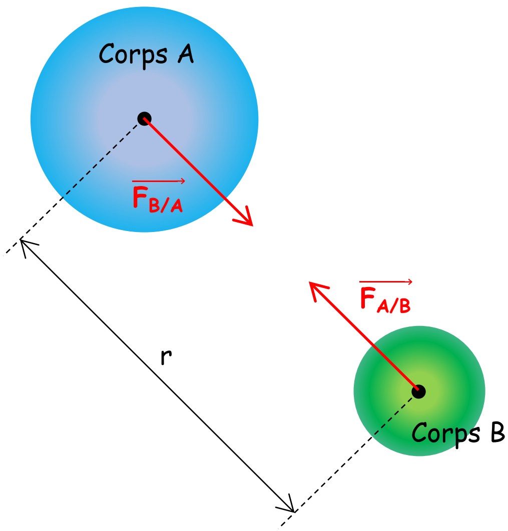
$$\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m.\vec{g} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m.\overrightarrow{a_G}$$

Remarque: Si $\sum \overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0}$ alors $\overrightarrow{a_G} = \vec{0}$ et par conséquent $\overrightarrow{V_G}$ reste constant en direction, sens et norme (on retrouve la première loi de Newton).

4- Troisième loi de Newton - Actions réciproques

On dit que deux corps A et B sont en interaction si l'état de mouvement ou de repos de l'un (corps A) dépend de l'existence de l'autre (corps B).

Une interaction entre deux corps A et B suppose toujours deux actions réciproques: celle de A sur B et celle de B sur A.

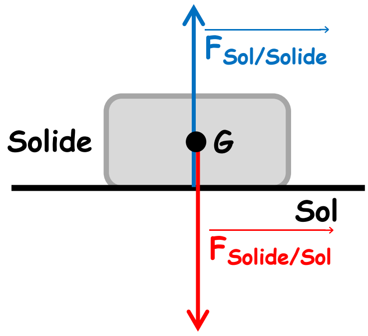


Lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique modélisée par la force $\overrightarrow{F_{A/B}}$, alors le corps B exerce sur le corps A l'action mécanique modélisée par la force $\overrightarrow{F_{B/A}}$. Que les corps A et B soient au repos ou en mouvement, les deux forces $\overrightarrow{F_{A/B}}$ et $\overrightarrow{F_{B/A}}$ sont toujours égales et opposées.

$$\overrightarrow{F_{B/A}} = -\overrightarrow{F_{A/B}}$$

Un solide, immobile par rapport à la Terre, appuie sur le sol horizontal avec une force $\overrightarrow{F_{Solide/Sol}}$. Et réciproquement, le sol soutient le solide, avec une force $\overrightarrow{F_{Sol/Solide}}$, telle que:

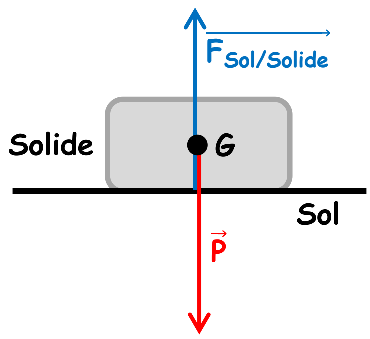
$$\overrightarrow{F_{Sol/Solide}} = -\overrightarrow{F_{Solide/Sol}}$$



Remarque: Les vecteurs $\overrightarrow{F_{Solide/Sol}}$ et $\overrightarrow{F_{Sol/Solide}}$ ont des points d'applications différents.

Le vecteur poids $\vec{P}$ existe même en l'absence du sol. Si on confond le poids $\vec{P}$ appliqué au centre de gravité ***G*** avec la force de Newton exercée par la Terre sur le solide, l'action réciproque représentant l'action du solide sur la Terre serait appliquée au centre de la Terre.

Sur le solide S s'exercent deux forces extérieures: le poids $\vec{P}$ et la force $\overrightarrow{F_{Sol/Solide}}$.



Comme le solide est au repos dans le référentiel terrestre, on peut, d'après le principe de l'inertie, écrire:

$$\vec{P} + \overrightarrow{F_{Sol/Solide}} = \vec{0}$$

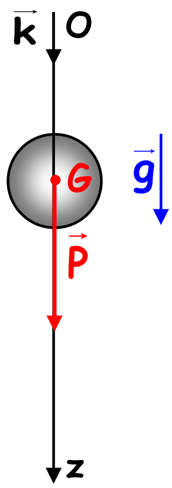
5- Chute libre

Un solide est en chute libre s'il n'est soumis qu'à son poids $\vec{P}$.

C'est ce qui se passe si on supprime l'air dans une enceinte pour y étudier la chute d'un solide dans le vide (au voisinage de sol de la Lune, sans atmosphère, toutes les chutes sont libres).

***Remarque:** La chute est quasi libre si on étudie, dans l'air, la chute d'une bille de masse volumique grande par rapport à la masse volumique de l'air (la poussée d'Archimède est alors négligeable par rapport au poids) sur une hauteur de quelques mètres (les forces de frottement sont, à faible vitesse, également négligeables par rapport au poids).*

On considère une petite bille en plomb de masse m est lâchée, sans vitesse initiale, à partir de l'origine d'un axe vertical **$(O;\ \vec{k})$** orienté vers le bas. Après un parcours d'une hauteur **H**, la bille frappe le sol.



La bille étant en plomb, la valeur **P** de son poids $\vec{P}$ est très grande par rapport à la valeur Π de la poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ dans l'air. On peut donc négliger la poussée d'Archimède.

De plus, la bille est petite, de forme sphérique, sa vitesse restera faible (hauteur de chute petite). Dans ces conditions, la force de frottement fluide exercée par l'air sur la surface de la bille est également négligeable par rapport au poids.

La seule force agissant sur la bille est donc le poids $\vec{P}=m.\vec{g}$. La chute est dite libre.

Les équations horaires du mouvement sont:

$$z(t) = \frac{1}{2}.g.t^2 \qquad v(t)=g.t \qquad a=g$$

Si on connait la durée de chute **t** on peut donc calculer la hauteur **H** de chute ainsi que la vitesse V_{sol} d'arrivée au sol.

Avec un smartphone ou une tablette, on peut réaliser la chronophotographie de la chute libre d'une balle à l'aide de l'application "cliché mouvement". La photographie ci-contre a été prise avec cette application.

D'après cette chronophotographie, on peut voir que la balle est animée d'un mouvement rectiligne accéléré car la distance entre deux positions successives de la balle augmente et donc sa vitesse.

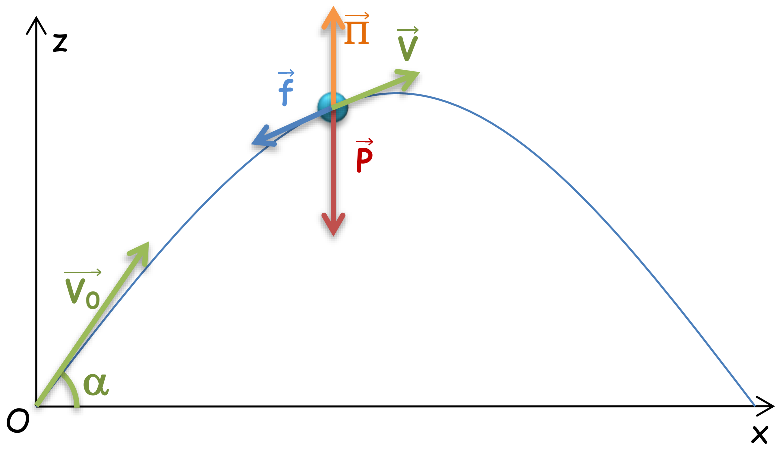
6- Mouvement parabolique d'un projectile

On appelle projectile tout corps lancé au voisinage de la Terre avec une vitesse initiale $\vec{V_0}$ faisant un angle α avec l'horizontale.

En mécanique le mouvement d'un corps dépend de l'accélération (donc des forces) et des conditions initiales (vitesse et position).

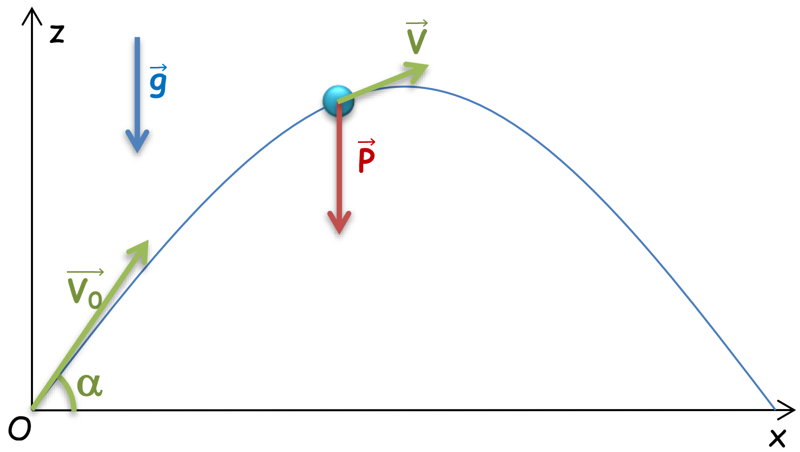
Le système étudié est le projectile dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On y associe le repère cartésien $(O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$.

Le projectile M (système) se déplaçant dans le référentiel Terrestre peut être soumis à diverses forces (poids $\vec{P}$, poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$, forces de frottement fluides $\vec{f}$, etc.).



Toutefois, on ne tiendra compte ni de la poussée d'Archimède, ni de la force de frottement fluide exercée sur le projectile.

Etant donné que le mouvement se fait dans une petite région l'accélération est constante, et ne dépend ni de la masse de l'objet, ni de la manière dont il a été lancé: on dira que le champ de pesanteur $\vec{g}$ est invariant.



On assimilera le projectile à un point matériel M.

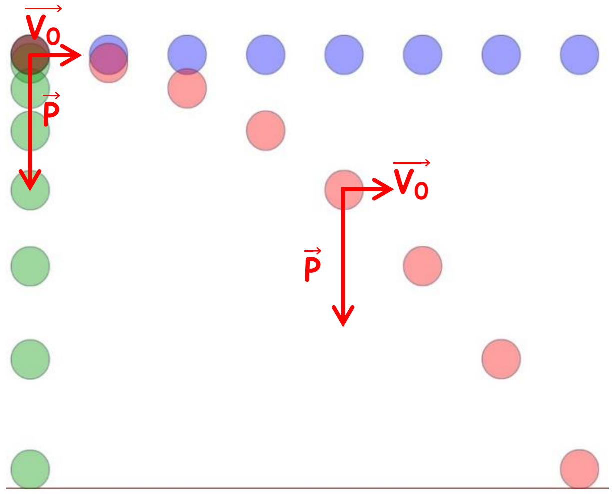
La seule force qui agit est le poids $\vec{P} = m.\vec{g}$ du corps: le solide est en "chute libre".

L'étude de ce mouvement sera étudié ultérieurement car il fait appel à la seconde loi de Newton qui est hors programme.

Toutefois, il faut savoir que ce mouvement qui se fait dans un plan peut être décomposé en deux type de mouvement:

- Un mouvement rectiligne uniforme qui se fait suivant l'axe Ox.
- Un mouvement rectiligne ralenti et/ou accéléré qui se fait suivant l'axe Oz.

Considérons l'exemple schématisé ci-contre. On lance une boule avec un vitesse initiale horizontale $\overrightarrow{V_0}$. La trajectoire de la boule est représentée par la boule rouge.



Si une boule lancée avec une vitesse initiale horizontale $\overrightarrow{V_0}$ n'était soumise à aucune force, son centre d'inertie aurait un mouvement rectiligne (horizontal) et uniforme, d'après le principe d'inertie.

Si la boule était lâchée sans vitesse initiale, elle tomberait sous l'effet de son poids $\vec{P}$ d'un mouvement rectiligne (vertical) et accéléré.

Le mouvement de la bille lancée avec une vitesse horizontale $\overrightarrow{V_0}$ et uniquement soumise son poids $\vec{P}$, est une combinaison des deux mouvements décrits précédemment:

- Elle avance horizontalement à la vitesse constante $\overrightarrow{V_0}$ (Boule en bleu).
- Elle chute verticalement sous l'effet de son poids $\vec{P}$ (Boule en vert).

Le mouvement global de la boule (Boule en rouge) décrit une courbe parabolique sous l'effet conjugué de sa vitesse initiale $\overrightarrow{V_0}$ et de son poids $\vec{P}$.