

## Mécanique du point

«Avouer qu'on s'est trompé, c'est rendre le plus éclatant hommage à la perspicacité de son esprit – G. Bachelard»

## 1 Étude cinématique – l'essentiel

La **cinématique** étudie le **mouvement d'un corps** sans s'intéresser aux causes qui le produisent (forces). Décrire un mouvement revient à préciser **où est l'objet, comment il se déplace et par rapport à quoi**.

### 1.1 Système étudié

Le **système** est le corps (ou l'ensemble de corps) dont on étudie le mouvement, noté en général {Système}.

Pour simplifier l'étude, dans le secondaire, on assimile le système à un **point matériel**, choisi comme son centre de gravité..

### 1.2 Le référentiel

Un **référentiel** est le solide de référence par rapport auquel on décrit le mouvement.

Il comprend :

- un **repère d'espace** (pour repérer les positions),
- un **repère de temps** (pour dater ces positions).

Référentiels usuels :

- **référentiel terrestre** : lié à la surface de la Terre,
- **référentiel géocentrique** : centre de la Terre,
- **référentiel héliocentrique** : centre du Soleil.

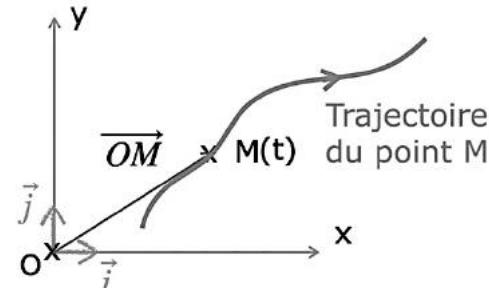
👉 Un même mouvement peut être décrit différemment selon le référentiel choisi.

### 1.3 Vecteur position et trajectoire

La position d'un point M à la date t est donnée par le **vecteur position**  $\overrightarrow{OM}$

Dans un repère plan  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  on a  $\overrightarrow{OM} = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$  qu'on peut écrire aussi  $\overrightarrow{OM} \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$

L'ensemble des positions successives occupées par le point constitue sa **trajectoire**.



### 1.4 Vecteur vitesse

La **vitesse** décrit la façon dont la position évolue au cours du temps.

- La vitesse **instantanée** est définie comme la dérivée temporelle du vecteur position :  $\vec{v}(t) = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$

👉 Application 1 : coordonnées du vecteur vitesse dans un repère donné  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .

Soit le vecteur position  $\overrightarrow{OM} = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$

$\vec{v}$  a pour coordonnées  $v_x$  et  $v_y$  dans ce repère. On peut aussi écrire  $\vec{v} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$ .

Montrer que  $v_x = \frac{dx}{dt}$  et que  $v_y = \frac{dy}{dt}$

Dans le repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  :  $\vec{v} = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j}$  et  $\vec{v} \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix}$

👉 Le vecteur vitesse est **tangent à la trajectoire** et orienté dans le sens du mouvement.

➡ Construction du vecteur **vitesse moyenne** à partir d'une chronophotographie

Une **chronophotographie** montre les positions successives d'un mobile, séparées par un **intervalle de temps constant  $\tau$** .

Sur une chronophotographie, le vecteur vitesse en un point est **approché** par le vecteur reliant les positions juste avant et juste après ce point (ou la position actuelle et la position suivante), **divisé par le temps correspondant**.

Le **vecteur vitesse** au point  $M_2$  est approché par :  $\vec{v}(t_2) = \vec{v}_2 = \frac{\vec{M}_1\vec{M}_3}{t_3-t_1} = \frac{\vec{M}_1\vec{M}_3}{2\tau}$

ou par  $\vec{v}(t_2) = \vec{v}_2 = \frac{\vec{M}_2\vec{M}_3}{t_3-t_2} = \frac{\vec{M}_2\vec{M}_3}{\tau}$ .

Caractéristiques du vecteur vitesse  $\vec{v}_2$

- **Direction** : tangente à la trajectoire au point  $M_2$ , parallèle à la droite  $M_1M_3$
- **Sens** : celui du mouvement
- **Valeur** :  $v_2 = \frac{M_1M_3}{2\tau}$  ou  $v_2 = \frac{M_2M_3}{\tau}$
- **Longueur du vecteur** : fixée par une **échelle des vitesses** (exemple : 1 cm  $\leftrightarrow$  0,5 m·s $^{-1}$ )

💡 Plus l'intervalle de temps  $\tau$  est petit, plus les deux méthodes donnent des résultats proches de la vitesse instantanée.

## 1.5 Vecteur accélération

L'**accélération** décrit l'évolution de la vitesse (variation de la norme et/ou de la direction).

- Elle est définie comme la dérivée temporelle de la vitesse :  $\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}$

⌚ Application 2 : coordonnées du vecteur accélération dans un repère donné  $(O, \vec{i}, \vec{j})$ .

Soit le vecteur vitesse  $\vec{v} = v_x(t)\vec{i} + v_y(t)\vec{j}$

Le vecteur accélération  $\vec{a}$  a pour coordonnées  $a_x$  et  $a_y$  dans ce repère. On peut aussi écrire  $\vec{a} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}$ .

Montrer que  $a_x = \frac{dv_x}{dt}$  et que  $a_y = \frac{dv_y}{dt}$

Dans le repère  $(O, \vec{i}, \vec{j})$  :  $\vec{a} = \frac{dv_x}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j}$  et  $\vec{a} \begin{pmatrix} \frac{dv_x}{dt} \\ \frac{dv_y}{dt} \end{pmatrix}$

👉 Une accélération non nulle signifie que le mouvement n'est **pas uniforme** (la vitesse change).

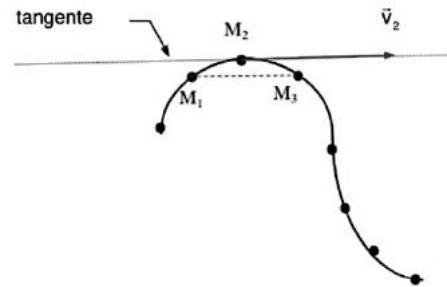
➡ Construction du vecteur **accélération moyenne** à partir d'une chronophotographie

Au point  $M_2$ , à la date  $t_2$ , le **vecteur accélération** peut être **approché** par :  $\vec{a}(t_2) \approx \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$

En utilisant les points  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$  :

$\Delta\vec{v} = \vec{v}_3 - \vec{v}_1$  et  $\Delta t = t_3 - t_1 = 2\tau$  (ou  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_3 - \vec{v}_2$  et  $\Delta t = t_3 - t_2 = \tau$ )

Donc :  $\vec{a}(t_2) \approx \frac{\vec{v}_3 - \vec{v}_1}{2\tau}$  (ou  $\vec{a}(t_2) \approx \frac{\vec{v}_3 - \vec{v}_2}{\tau}$ )

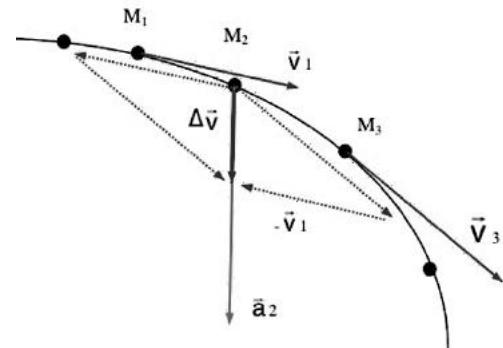


## Méthode de construction (graphique)

1. Construire les vecteurs vitesses  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_3$  aux points  $M_1$  et  $M_3$ .
2. Reporter les vecteurs  $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_3$  au point  $M_2$ .
3. Construire le vecteur  $\Delta\vec{V} = \vec{V}_3 - \vec{V}_1$  (par la **méthode du parallélogramme**).
4. Le vecteur accélération  $\vec{a}(t_2)$  est **colinéaire** et de **même sens** que  $\Delta\vec{V}$ .

Caractéristiques du vecteur accélération  $\vec{a}(t_2)$  :

- **Direction** : celle de  $\Delta\vec{V}$
- **Sens** : celui de  $\Delta\vec{V}$
- **Valeur** :  $a_2 = \frac{\Delta V}{2\tau}$
- **Longueur du vecteur** : fixée par une **échelle des accélérations** (exemple : 1 cm  $\leftrightarrow$  5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )



### Application 3 Équation de la trajectoire d'une balle de tennis dans le champ de pesanteur

On étudie le mouvement d'une balle dans le **référentiel terrestre** (référentiel du laboratoire), supposé galiléen, soumis au **champ de pesanteur terrestre**  $\vec{g}$ .

On utilise le repère plan  $(0, \vec{i}, \vec{j})$  :  $\vec{i}$  est orienté **horizontalement**, de gauche à droite ;  $\vec{j}$  est orienté **verticalement**, de bas en haut.

La position du centre d'inertie  $M$  de la balle à l'instant  $t$  est donnée par le vecteur position :

$$\vec{OM}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j}$$

avec les **équations horaires** :

$$x(t) = V_{0x} t$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + V_{0y} t + h$$

où  $V_{0x}$ ,  $V_{0y}$ ,  $h$  et  $g$  sont des **constantes indépendantes du temps**.

1. Déterminer les **vecteurs vitesse**  $\vec{v}(t)$  et **accélération**  $\vec{a}(t)$ .
2. Déterminer l'**équation de la trajectoire**, c'est-à-dire l'expression de  $y$  en fonction de  $x$ , indépendamment du temps.
3. Déterminer la **hauteur du point culminant** de la trajectoire.

### Application 4 Décollage de fusée Ariane (Bac métropole 2019)

On chercher à étudier le mouvement d'une fusée lors du début de la phase de décollage.

Caractéristiques des fusées Ariane

Fusée	Ariane 1	Ariane 2	Ariane 3	Ariane 4	Ariane 5
Masse au décollage (en tonne)	210	219	234	243 à 480	750 à 780
Poussée * (en kN)	2500	2700	2700	2700 à 5400	12000 à 13000
Hauteur de la fusée (en m)	47	49	49	59	52

Pour faciliter les mesures, les différentes images de la fusée ont été décalées horizontalement les unes par rapport aux autres. L'axe vertical a pour origine la base de la fusée. L'image 1 de la figure 1 précise l'endroit de la fusée qui sert à repérer son mouvement vertical. Son ordonnée sur l'axe des  $y$  est notée  $y_1$ .

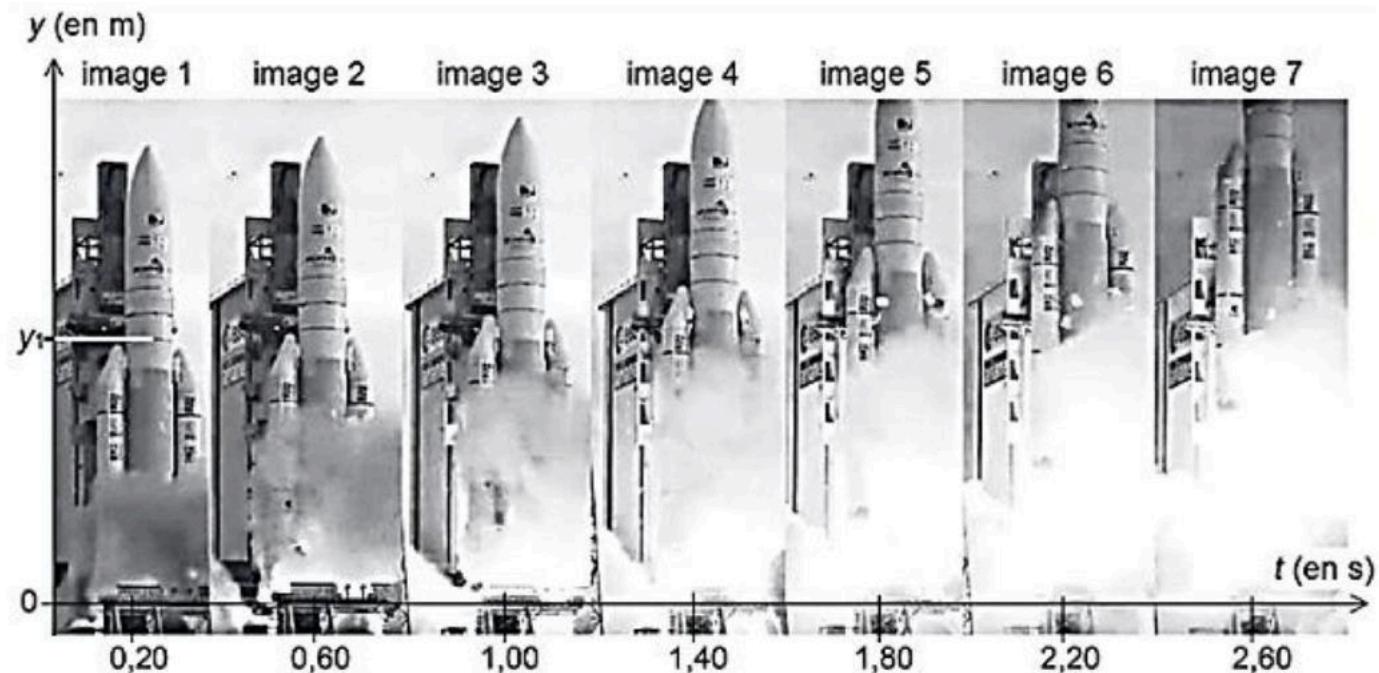


Figure 1 : Chronophotographie du début de la phase de décollage de la fusée Ariane 5

L'étude de cette chronophotographie donne les résultats répertoriés dans le tableau et le graphique suivants :

Image	$t$ (s)	$y$ (m)	$v_y$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	0,20	$y_1 = 30,1$	
2	0,60	31,5	$v_2$
3	1,00	33,3	6,8
4	1,40	36,9	9,6
5	1,80	$y_5$	12
6	2,20	46,5	15
7	2,60	52,9	

Figure 2. Détermination expérimentale de la position et de la vitesse de la fusée

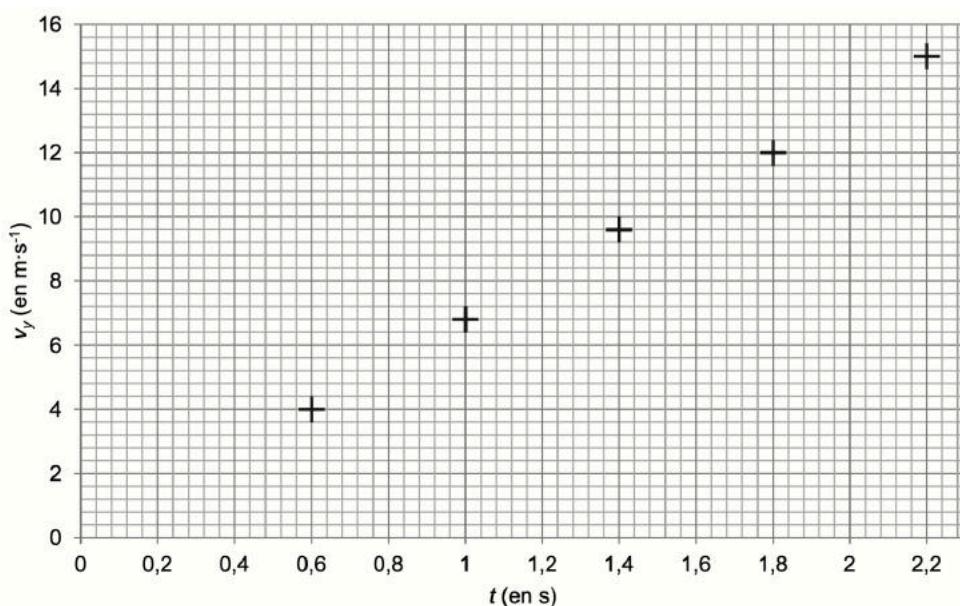


Figure 3 Évolution de la valeur de la vitesse de la fusée au cours du temps

- Identifier le système étudié et le référentiel d'étude. Il faudra préciser le repère.
- Estimer, à l'aide de la figure 1, la valeur de  $v_y$ . Détailler la démarche.
- Estimer, à l'aide du tableau de la figure 2, la valeur de  $a_y$ . Détailler la démarche et vérifier que ce résultat est cohérent avec le graphe de la figure 3.
- Montrer que la valeur de l'accélération de la fusée pendant la durée de l'étude est de l'ordre de  $7 \text{ m.s}^{-2}$
- Préciser, en justifiant, la direction et le sens du vecteur accélération de la fusée.

### **Calculs numériques de vitesse et d'accélération**

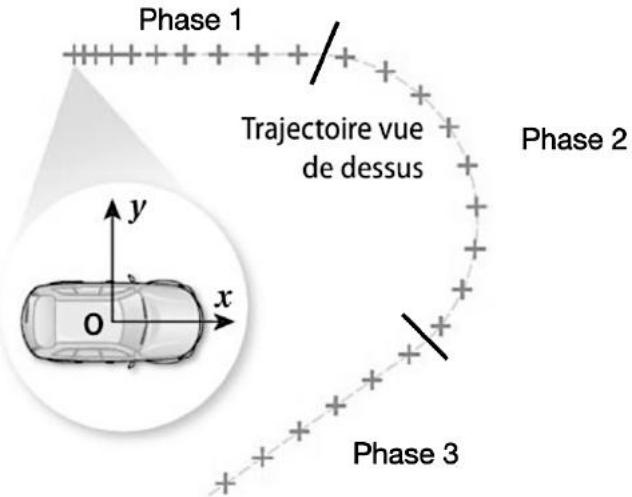
Il s'agit à présent de retrouver les valeurs de vitesse  $v_y$  données dans le tableau de la figure 2 puis les valeurs d'accélération  $a_y$  à partir des coordonnées de position  $y$  et des temps donnés dans le tableau de la figure 2 en utilisant le langage de programmation Python !

- Compléter l'extrait du code Python ci-dessous. Exécuter le programme Python complété sur le compilateur en ligne <http://Trinket.io/python3> afin d'afficher les valeurs de  $v_y$  du tableau précédent.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
t=[ ] # A COMPLETER
y=[ ] # A COMPLETER
Vy=[ ]
#Calcul des composantes Vy
Vy=[ ]
for i in range(1,6) :
    Vy[i]=round( , 2 ) # A COMPLETER
    Vy.append(Vyi)
print('la liste des valeurs de Vy est :', Vy)
```

### **Application 5 Mouvement d'une voiture et accélération**

Pour chaque phase du mouvement, préciser le type de mouvement et indiquer si le vecteur accélération  $\vec{a}$  est nul ou non.



### **Application 6 Dragster**

Le dragster est un sport mécanique d'accélération ouvert aux véhicules à deux et quatre roues. Le dragster de la photo ci-contre a parcouru 19,2 m en 0,86 s. Dans le même temps, sa vitesse est passée de 0 à 160 km/h.

A partir des données précédentes, montrer que l'accélération horizontale du dragster est de  $5,3 \text{ g}$ .



## 2 Les différentes forces

### 2.1 Force électrostatique

Une **charge électrique**  $q_A$ , placée en un point A, crée dans l'espace qui l'entoure un **champ électrostatique**.

En un point B, situé à une distance  $r$  de A, ce champ s'écrit :  $\vec{E}(B) = k \frac{q_A}{r^2} \vec{u}$

où :

- $q_A$  est la charge source (en coulomb, C),
- $r$  est la distance entre A et B (en mètre),
- $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$  est la constante de Coulomb,
- $\vec{u}$  est le vecteur unitaire dirigé de A vers B.

👉 Le **champ électrostatique** est une **propriété de l'espace**, créée par la charge  $q_A$ , indépendamment de la présence d'une autre charge.

Si l'on place maintenant une **charge test**  $q_B$  au point B, elle subit une **force électrostatique** donnée par :  $\vec{F}_{A/B} = q_B \vec{E}(B)$

En combinant les deux expressions, on obtient la loi de

Coulomb sous forme vectorielle :  $\vec{F}_{A/B} = k \frac{q_A q_B}{r^2} \vec{u}$

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

Idée clé à retenir

- **Charge**  $q_A \rightarrow$  crée un **champ**  $\vec{E}$
- **Charge**  $q_B$  placée dans ce champ  $\rightarrow$  subit une **force**  $\vec{F}$

👉 Le champ joue le rôle d'**intermédiaire** : on décrit d'abord l'action de la charge source sur l'espace, puis l'action de cet espace sur une autre charge.

### 2.2 Force gravitationnelle

Une **masse**  $m_A$ , placée en un point A, crée dans l'espace un **champ gravitationnel** (ou **intensité de pesanteur**).

En un point B, situé à une distance  $r$  de A, ce champ s'écrit :  $\vec{g}(B) = -G \frac{m_A}{r^2} \vec{u}$

où :

- $m_A$  est la masse source (en kg),
- $r$  est la distance entre A et B (en m),
- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$  est la constante universelle de gravitation,
- $\vec{u}$  est le vecteur unitaire dirigé de A vers B.

👉 Le signe **moins** indique que le champ est **dirigé vers la masse**  $m_A$  : l'interaction gravitationnelle est toujours attractive.

Si l'on place une **masse test**  $m_B$  au point B, elle subit une **force gravitationnelle** :  $\vec{F}_{A/B} = m_B \vec{g}(B)$

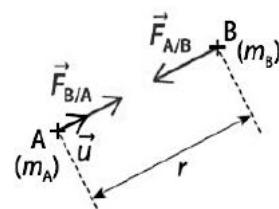
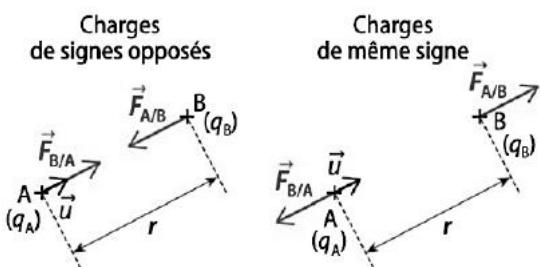
En combinant les expressions, on obtient :  $\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}$

👉 La masse  $m_A$  **attire** la masse  $m_B$ , la force étant orientée selon  $-\vec{u}$ .

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

Idée clé à retenir

- **Une masse crée un champ gravitationnel**
- **Une masse placée dans ce champ subit une force**
- Le champ gravitationnel est **toujours attractif** et **dirigé vers la masse source**

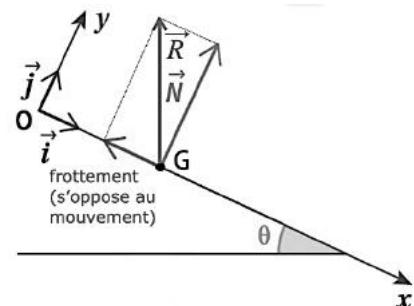


## 2.3 Force de contact entre solides

Lorsqu'un solide est en contact avec un support, celui-ci exerce sur le solide une force appelée **réaction du support**  $\vec{R}$ .

On décompose cette force en deux composantes :

- la **composante normale**  $\vec{N}$ , perpendiculaire au support ;
- la **composante tangentielle**  $\vec{f}$ , correspondant aux **forces de frottement**.



L'étude de ces forces se fait à l'aide de la **projection des vecteurs** sur des axes adaptés (voir fiche méthode « Projection des vecteurs »)

## 2.4 Force de tension

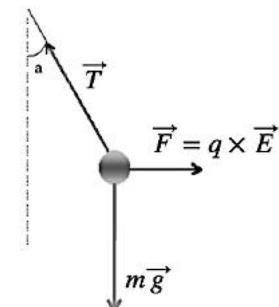
Lorsqu'un système est **accroché à un fil tendu**, le fil exerce sur lui une **force de tension**  $\vec{T}$ .

Cette force est **dirigée suivant le fil** et **orientée du système vers l'autre extrémité du fil**.

**Exemple :**

Une particule chargée, suspendue à un fil et placée dans un champ électrique  $\vec{E}$ , est à l'**équilibre** sous l'action de trois forces :

- le poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  ;
- la force électrique  $\vec{F} = q\vec{E}$  ;
- la force de tension du fil  $\vec{T}$ .



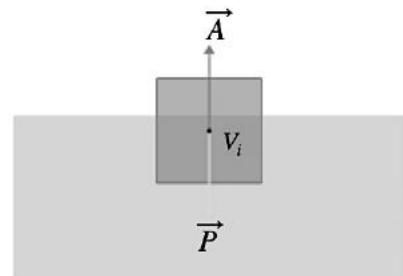
## 2.5 Force exercée par un fluide sur un solide

### Force d'Archimède

Lorsqu'un corps est **plongé dans un fluide au repos**, le fluide exerce sur lui des **forces de pression** réparties sur toute sa surface.

Ces forces de pression :

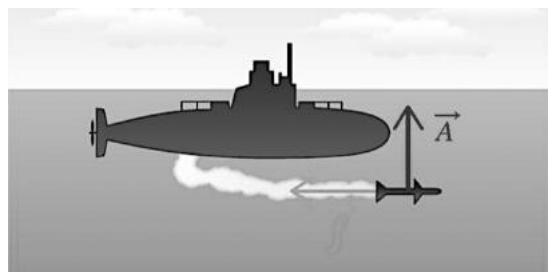
- augmentent avec la profondeur ;
- sont normales à la surface du corps ;
- se compensent presque partout.



La **résultante** de ces forces de pression est la **poussée**

**d'Archimède** :  $\vec{A} = -\rho_f \times V_i \times \vec{g}$  avec.  $\rho_f$  la masse volumique du

fluide,  $V_i$  est le volume de la partie du corps qui se trouve immergée dans le fluide et  $\vec{g}$  le champ gravitationnel.



### Force de frottement fluide (résistance du fluide)

Lorsqu'un **solide est plongé dans un fluide et se déplace par rapport à celui-ci**, le fluide exerce sur lui une **force de frottement fluide**  $\vec{f}$ .

Cette force est **opposée au mouvement** et traduit la **résistance du fluide** au déplacement du solide.

Dans certains cas (particule sphérique, vitesses faibles), la **loi de Stokes** permet d'exprimer cette force :

$$\vec{f} = -6\pi \times R \times \eta \times \vec{v} \quad \text{où :}$$

- $R$  est le rayon de la particule (en m),
- $\vec{v}$  est sa vitesse (en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),
- $\eta$  est la viscosité du fluide (en  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

👉 **À retenir** : la force de frottement fluide est proportionnelle à la vitesse (à faible vitesse) et **s'oppose toujours au mouvement** (*la relation n'est pas à apprendre par cœur*).

📘 Voir la fiche méthode 8 : « Projection des vecteurs »

➡ Faire les exemples 1 et 2 concernant la projection des forces sur les axes Ox et Oy.

### 3 Principe d'inertie – première loi de Newton

#### 3.1 *Référentiel galiléen*

Un référentiel galiléen est défini comme un référentiel dans lequel le principe d'inertie est vérifié.

Un référentiel est dit **galiléen** s'il est au repos ou en mouvement de translation rectiligne uniforme, sans rotation.

À l'inverse : un référentiel qui **accélère, ralentit ou tourne** n'est **pas galiléen**.

⚠ En toute rigueur, les référentiels **terrestre, géocentrique et héliocentrique** ne sont pas galiléens (ils sont en rotation).

Cependant, pour des expériences de **durée courte** (quelques secondes à quelques minutes), on peut **assimiler le référentiel terrestre à un référentiel galiléen**.

#### 3.2 *Énoncé du principe d'inertie*

Dans un référentiel **galiléen**, le centre de gravité d'un système reste **au repos ou en mouvement rectiligne uniforme** (MRU) si et seulement si la somme des forces extérieures qui s'exercent sur lui est nulle.

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \vec{0} \Leftrightarrow \vec{V} = \text{constante}$$

Idée clé à retenir

- Forces extérieures nulles  $\Rightarrow$  **vecteur vitesse constante** ( $\rightarrow$  repos ou MRU)
- **vecteur vitesse constante** ( $\rightarrow$  repos ou MRU)  $\Rightarrow$  Forces extérieures nulles
- **vecteur vitesse non constante**  $\Rightarrow$  forces extérieures non nulles (contraposée de principe d'inertie)

### 4 Principe fondamental de la dynamique - deuxième loi de Newton

#### 4.1 *Principe fondamental de la dynamique (PFD)*

Dans un **référentiel galiléen**, pour un système modélisé par un **point matériel**, la **somme des forces extérieures** qui s'exercent sur le système est égale au produit de sa **masse** par son **accélération** :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = m \vec{a}$$

où :  $m$  est la masse du système et  $\vec{a}$  est l'accélération de son centre de son centre de gravité (en terminale). En mécanique du point, on assimile le système à un point situé en son centre de gravité (qui coïncide avec le centre de masse).

Idée clé à retenir

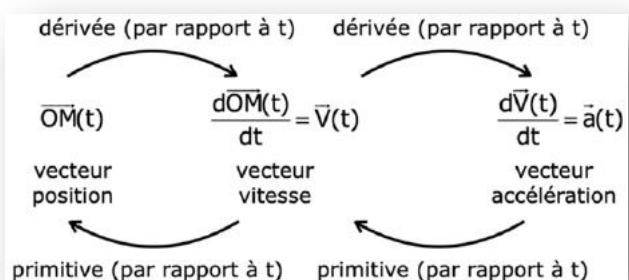
- Forces non nulles  $\Rightarrow$  accélération
- Forces nulles  $\Rightarrow$  vecteur vitesse constante

#### 📘 Application 9 2<sup>e</sup> loi contient 1<sup>e</sup> loi

Montrer que le principe d'inertie (1<sup>re</sup> loi de Newton) est un cas particulier du principe fondamental de la dynamique (2<sup>e</sup> loi de Newton)

## 4.2 Méthode générale d'utilisation de PFD

1. Définir le système étudié.
2. Choisir le référentiel (supposé galiléen).
3. Faire le bilan des forces extérieures appliquées au système.
4. Écrire la deuxième loi de Newton sous forme vectorielle.
5. Projeter l'équation vectorielle sur les axes choisis afin d'obtenir les **coordonnées du vecteur accélération**.
6. Déterminer la vitesse, puis la position, en primitivant successivement l'accélération :
  - o la vitesse est la **primitive** de l'accélération ;
  - o la position est la **primitive** de la vitesse.
7. Utiliser les **conditions initiales** ( $t = 0$ ) pour déterminer les constantes d'intégration :  $\vec{v}(0)$  et  $\vec{OM}(0)$  sont généralement données dans l'énoncé.
8. Déterminer l'équation de la **trajectoire**  $y(x)$  à partir des équations horaires  $x(t)$  et  $y(t)$ , en éliminant le paramètre  $t$ .

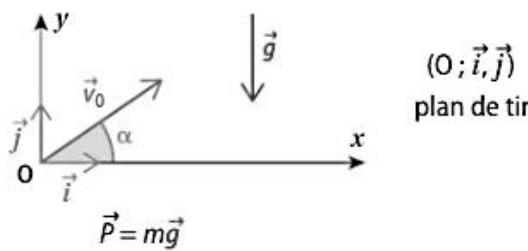


A connaître les trois primitives suivantes :

Primitive (par rapport à $t$ )	
$0$	$\rightarrow k_1$
$k_2$	$\rightarrow k_2 \times t + k_1$
$k_3 \times t + k_2$	$\rightarrow \frac{k_3}{2} \times t^2 + k_2 \times t + k_1$
Constantes $k_1, k_2, k_3$	indépendantes de temps $t$

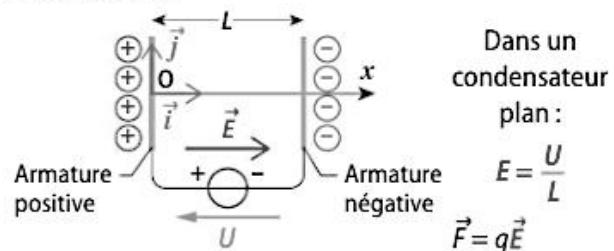
### CHAMP DE PESANTEUR $\vec{g}$ UNIFORME

Mouvement d'un projectile de masse  $m$



### CHAMP ÉLECTRIQUE $\vec{E}$ UNIFORME

Mouvement d'une particule de charge électrique  $q$  et de masse  $m$



#### Utilisation de la deuxième loi de Newton

$$\begin{cases} \vec{a} = \vec{g} \\ \begin{cases} a_x(t) = 0 \\ a_y(t) = -g \end{cases} \end{cases}$$

$$\text{Accélération } \vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt}(t)$$

$$\begin{cases} \vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E} \\ a_x(t) = \frac{q}{m} E_x \end{cases}$$

#### Primitive + utilisation des conditions initiales

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cos(\alpha) \\ v_y(t) = -gt + v_0 \sin(\alpha) \end{cases}$$

$$\text{Vitesse } \vec{v}(t) = \frac{d\vec{OM}}{dt}(t)$$

$$v_x(t) = \frac{q}{m} E_x t$$

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cos(\alpha) t \\ y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 \sin(\alpha) t \end{cases}$$

$$\text{Position } \vec{OM}(t)$$

$$x(t) = \frac{1}{2} \frac{q}{m} E_x t^2$$

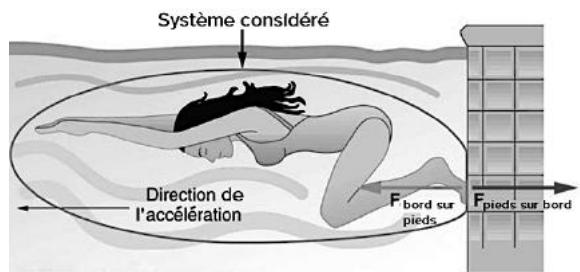
#### Primitive + utilisation des conditions initiales

## 5 Principe des actions réciproques - troisième loi de Newton

Lorsque deux corps A et B sont en interaction, chacun exerce sur l'autre une force.

Ces deux forces ont même direction, même intensité et sont de sens opposés :  $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$  : *force exercée par A sur B*  $\vec{F}_{B/A}$  : *force exercée par B sur A*

💡 Remarque : les forces d'action et de réaction s'exercent sur deux objets différents ; elles ne peuvent donc pas se compenser.



## 6 Théorème de l'énergie mécanique

### 6.1 Énergie mécanique

L'énergie mécanique d'un système est la somme de son énergie cinétique  $E_c$  et de ses énergies potentielles  $E_p$ .

$$E_m = E_c + E_p \quad (\text{en joule, J})$$

L'énergie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \begin{array}{l} m : \text{masse du système en kg} \\ v : \text{vitesse du système en m. s}^{-1} \\ E_c : \text{énergie cinétique en J} \end{array}$$

L'énergie potentielle de pesanteur :

$$E_{pp} = m \times g \times z \quad \begin{array}{l} m : \text{masse du système en kg} \\ g : \text{intensité de champ de pesanteur en m. s}^{-2} \text{ équivalent à N. kg}^{-1} \\ z : \text{altitude du système en m (mesurée par rapport à un niveau de référence choisi).} \\ E_{pp} : \text{énergie potentielle de pesanteur en J} \end{array}$$

L'énergie potentielle électrique :

$$E_{p,\text{élec}} = q \times U \quad \begin{array}{l} q : \text{charge du système en Coulomb} \\ U : \text{potentiel électrique au point considéré en Volt (V). (1 V = J. C}^{-1} \text{)} \\ E_{p,\text{élec}} : \text{énergie potentielle électrique en J} \end{array}$$

### 6.2 Conservation et variation de l'énergie mécanique

#### Cas sans forces non conservatives

En l'absence de forces non conservatives (en Terminale les frottements) :  $\Delta E_m = E_m(\text{final}) - E_m(\text{initial}) = 0$

👉 L'énergie mécanique se conserve : au cours du mouvement, l'énergie cinétique peut se transformer en énergie potentielle, et inversement.

#### Cas avec forces non conservatives

En présence de forces non conservatives (frottements) :  $\Delta E_m(A \rightarrow B) = \sum W_{AB}(\vec{F}_{NC}) < 0$

où  $W_{AB}(\vec{F}_{NC})$  est le travail de la force non conservative  $\vec{F}_{NC}$  entre A et B.

👉 L'énergie mécanique diminue, car une partie est dissipée (souvent sous forme de chaleur).

#### Travail d'une force (rappel)

Pour une force constante au cours du déplacement  $\vec{AB}$  :  $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F_{AB} \cos(\alpha)$

où  $\alpha$  est l'angle entre la force et le déplacement.

- Travail moteur :  $W > 0 \Rightarrow$  la force apporte de l'énergie au système  $\Rightarrow W_{AB}(\vec{F}) > 0$
- Travail résistant :  $W < 0 \Rightarrow$  la force retire de l'énergie au système  $\Rightarrow W_{AB}(\vec{F}) < 0$

💡 Idées clés à retenir

- Sans frottements  $\rightarrow$  énergie mécanique conservée
- Avec frottements  $\rightarrow$  énergie mécanique diminue
- Le travail d'une force est un échange d'énergie

## 7 Théorème de l'énergie cinétique

La **variation de l'énergie cinétique** d'un système entre deux points A et B est égale à la **somme des travaux des forces extérieures** qui s'exercent sur le système au cours du déplacement de A vers B :

$$\Delta E_c(A \rightarrow B) = E_c(B) - E_c(A) = \frac{1}{2}mv_B^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 = \sum W_{AB}(\vec{F}_{ext})$$

### 💡 Idées clés à retenir

- une **force qui travaille** modifie l'énergie cinétique ;
- la variation d'énergie cinétique dépend de la **somme des travaux** des forces extérieures ;
- le théorème est valable **quel que soit le type de forces** (conservatives ou non).

### Plan de travail

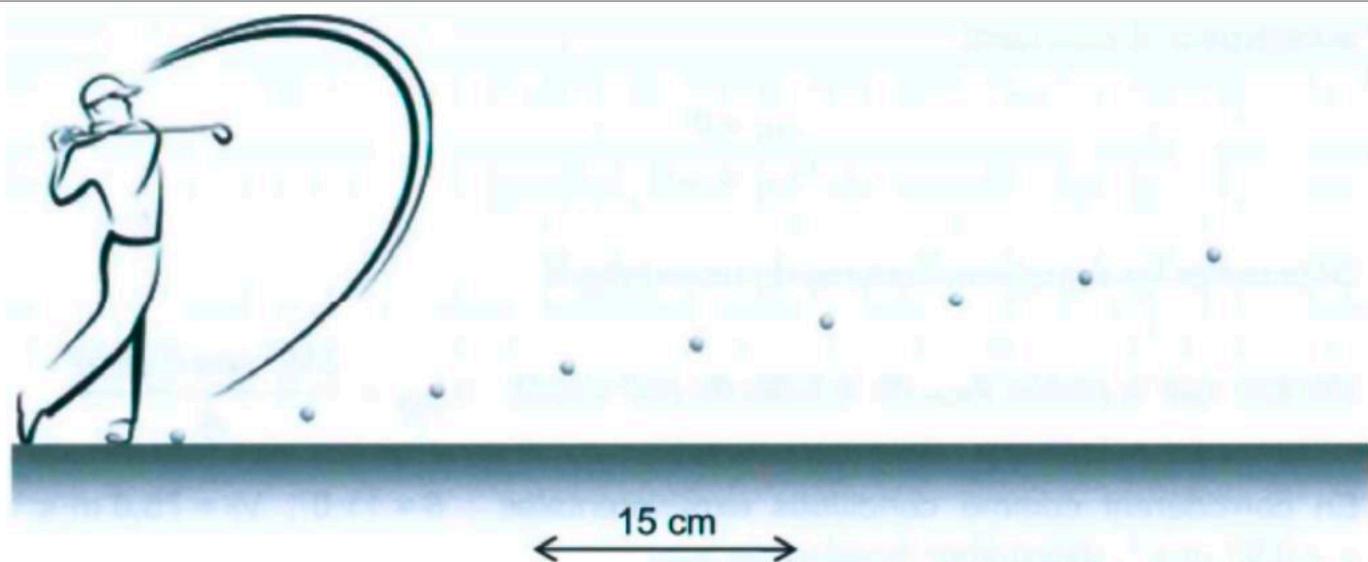
Exigences et capacités exigibles du Chapitre 7 : Mécanique du point	Exercices + TP	Exercices Hatier <sup>1</sup>
Chronophotographie : déterminer les coordonnées du vecteur position en fonction du temps et en déduire les coordonnées approchées ou les représentations des vecteurs vitesse et accélération.	TP1 Applications 4 et 5	20 p.302 45 p.310
Vecteurs position, vitesse et accélération d'un point.	Applications 1, 2 et 3	6 à 14 du QCM p.299 18 p.300 et 19 p.301 24 p.304 39 p.307 45 p.310
Mouvement rectiligne uniformément accéléré.	Applications 5 et 6	15, 16 et 17 du QCM p.299 28 p.304 38 p.306
Définir le vecteur vitesse comme la dérivée vecteur position, le vecteur accélération comme la dérivée de vecteur vitesse.	Cours	Ex.58 p.337
Équilibre d'un système. Première loi de Newton : principe d'inertie	FM Projection vecteur	Ex.14 à 16 du QCM p.327 Ex. 43 p.334 Ex.53 et 56 p.336 Ex.60 p.337
Référentiel galiléen. Deuxième loi de Newton. Forces	Applications 7 et 8	Ex.17 à 21 du QCM p.327
Troisième loi de Newton		Ex.22 et 23 du QCM p.327
Mouvement dans un champ de pesanteur uniforme.	Exercices 1, 2, 3. 4 et 5	Ex.7 à 17 du QCM p.357 Ex.18, 19, 20 p 358, 359 et 360 corrigés Ex. 30 p.363 Ex.37 et 39 p.364 Ex. 43 p.365, Ex. 52 p.367 Ex.55 p.370

<sup>1</sup> Les exercices ne seront pas tous corrigés en classe, mais des corrections seront mises sur Google Classroom.

Le swing d'un joueur de golf professionnel permet d'envoyer la balle à une distance (appelée « portée ») d'environ 250 mètres, distance mesurée horizontalement par rapport à l'impact initial entre le club et la balle de go. Le but de cet exercice est de confronter cette valeur de 250 mètres avec l'hypothèse d'un mouvement parabolique et de comprendre le décalage observé en considérant les conditions réelles du mouvement de la balle.

### Vitesse initiale de la balle

Le schéma qui suit propose la reconstruction d'une chronophotographie du mouvement d'une balle de golf après sa propulsion par le club. Le film a été réalisé par une caméra ultra-rapide permettant d'enregistrer 1 000 images par seconde. La représentation ci-dessous (figure 1) montre les 9 premières images de l'enregistrement de la balle, la première image de la balle correspondant à sa position initiale.



**Figure 1**

Remarque le golfeur représenté n'est pas à l'échelle de la chronophotographie et n'est ici qu'à titre purement illustratif.

- 1.1. À partir des données, déterminer l'intervalle de temps  $\Delta t$  qui sépare deux images de la chronophotographie.
- 1.2. À quel type de mouvement simple peut être assimilé le mouvement de la balle au début du vol représenté sur la figure 1 ?
- 1.3. En prenant en considération l'échelle proposée, déterminer le plus précisément possible la vitesse initiale  $V_0$  avec laquelle la balle de golf est propulsée.

### 2. Mouvement de la balle modélisée par un point matériel

La balle de golf est modélisée par un point matériel de masse  $m = 46 \text{ g}$  évoluant dans un champ de pesanteur terrestre  $\vec{g}$ . Dans ce modèle, la résistance de l'air n'est pas à prendre en compte.

Le mouvement de la balle est étudié dans le système d'axes (Oxy). À la date  $t = 0 \text{ s}$ , elle est placée à l'origine du repère O.



- 2.1. À partir d'une loi dont on donnera le nom, montrer que les composantes du vecteur accélération  $\vec{a}$  s'écrivent :

$$\vec{a} \begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

**2.2.** Déterminer les équations horaires du mouvement.

**2.3.** Déterminer l'équation cartésienne  $y(x)$  de la trajectoire. Vérifier qu'on a bien une parabole.

**2.4.** Montrer que la portée  $x_{max}$  de la balle de golf s'écrit :  $x_{max} = 2 \cdot \frac{V_0^2 \cdot \cos(\theta) \sin(\theta)}{g}$ .

**2.5.** En considérant comme conditions expérimentales :  $\theta = 11,0^\circ$ ,  $V_0 = 75,0 \text{ ms}^{-1}$ ,  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ , déterminer la valeur de  $x_{max}$ .

**2.6.** Comparer cette valeur calculée de la portée avec celle annoncée en introduction (les conditions initiales du mouvement restant identiques), et indiquer en quoi la valeur réelle de la portée dans l'air peut sembler surprenante.

### 3. De l'importance de l'air dans le vol d'une balle de golf

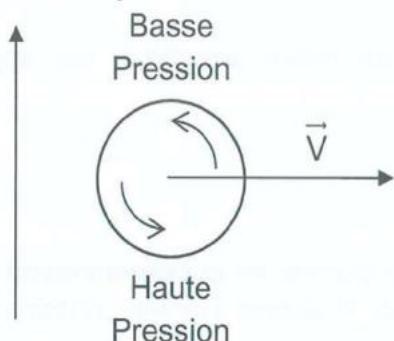
Dans cette partie, la balle n'est plus modélisée par un point matériel.

Lorsque le golfeur frappe la balle à l'instant  $t = 0$ , il utilise un club qui la propulse avec un angle d'une dizaine de degrés par rapport au sol. L'impact du club avec la balle a également pour conséquence de mettre celle-ci en rotation sur elle-même (phénomène de « backspin »). Ces rotations peuvent atteindre la fréquence de 2700 tours par minute.

#### Document 1 l'effet Magnus

L'effet Magnus est un phénomène qui se manifeste lorsque la balle possède un mouvement de rotation dans l'air.

Axe vertical y



Lorsque le golfeur imprime à la balle un mouvement de rotation arrière, appelé « backspin », la balle tourne dans le sens indiqué sur le schéma ci-contre.

L'air qui passe au-dessus de la balle est alors entraîné par la rotation de celle-ci, sa vitesse augmente et sa pression diminue.

Inversement, l'air qui passe au-dessous de la balle verra sa vitesse diminuer et sa pression augmenter.

Cette différence de pression est à l'origine d'une force supplémentaire  $\vec{F}$  verticale, dirigée vers le haut, supposée appliquée au centre de la balle et constante tout au long du mouvement.

On néglige, dans ce modèle, les autres effets dus à l'air.

**3.1.** Représenter sur la figure ci-dessus les forces modélisant les actions mécaniques s'exerçant sur la balle.

**3.2.** En déduire l'expression de la nouvelle composante  $a_y$  de l'accélération verticale en fonction de  $m$ ,  $g$  et  $F$ .

**3.3.** Estimer la valeur de l'intensité de la force  $\vec{F}$  pour retrouver la portée effectivement observée.

Exercice 2 : modélisation d'un parachute au laboratoire

(Bac 2018 Amérique Nord)

### 1. Physique du parachutisme

Le parachute est un dispositif qui engendre une forte résistance de l'air, ce qui a pour effet de ralentir le mouvement d'un objet à travers l'atmosphère. Les parachutes sont constitués de matériaux légers comme la soie ou le nylon. Pour qu'un parachute soit efficace il doit diminuer la vitesse limite d'au moins 75%.

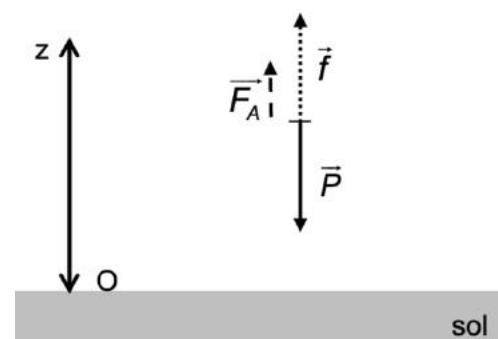
Pour quantifier le processus de freinage, l'étude de la chute d'une boule de pétanque attachée à un petit parachute est conduite au laboratoire. Au laboratoire, pour étudier le mouvement de chute d'une boule de pétanque accrochée à un parachute, une vidéo a été réalisée à l'aide d'une webcam, puis traitée en utilisant des logiciels de pointage d'images.

La masse de la boule de pétanque étant très supérieure à celle des tissus et fils utilisés pour fabriquer le parachute, on assimile la masse du système à la masse de la boule de pétanque.

Pour l'étude, les volumes de tissu utilisés pour réaliser la toile du parachute ainsi que celui des fils seront négligés. Seul sera pris en compte le volume de la boule.

Le système en chute est soumis :

- à l'action mécanique de la Terre modélisée par le poids  $\vec{P}$  du système ;
- à l'action mécanique exercée par l'air modélisée par une force de frottement  $\vec{f}$  et par la poussée d'Archimète  $\vec{F}_A$ .



Données :

- expression de l'intensité de la poussée d'Archimète :  $F_A = \rho_{\text{air}} \cdot V \cdot g$  ;  
avec :  $\rho_{\text{air}}$  (en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) : la masse volumique de l'air dans lequel est plongé le corps ;  
 $V$  (en  $\text{m}^3$ ) : le volume du corps placé dans l'air ;  
 $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  : l'intensité du champ de pesanteur.
- masse du système étudié :  $m = 400 \text{ g}$  ;
- diamètre de la boule :  $d = 10 \text{ cm}$  ;
- volume  $V$  d'une sphère de rayon  $r$  :  $V = \frac{4}{3} \pi r^3$
- masse volumique de l'air :  $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

1.1. Le référentiel d'étude étant supposé galiléen, écrire la seconde loi de Newton appliquée au système étudié.

1.2. Dans ce cadre d'étude, montrer, à l'aide d'un calcul numérique, que l'on peut négliger la poussée d'Archimète par rapport au système.

## 2. Étude expérimentale

Dans la suite on s'appuie sur les résultats expérimentaux ci-dessous et les données relatives au système fournies précédemment :

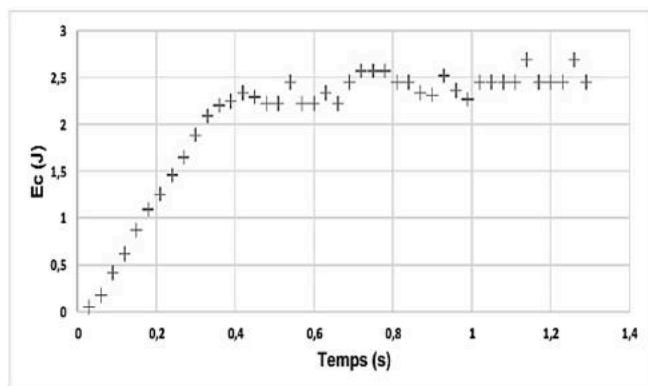


Figure 1 : évolution de l'énergie cinétique du système en fonction du temps

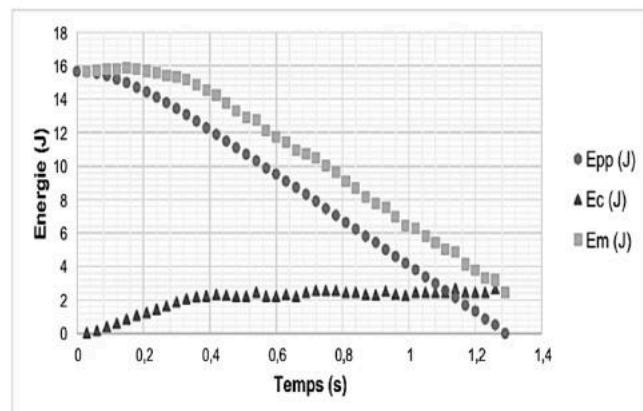


Figure 2 : évolutions des énergies cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique du système en fonction du temps.

L'énergie potentielle est choisie nulle au niveau du sol ( $z = 0$ ).

2.1. Comment évolue la vitesse du système lors de sa chute ? Justifier.

2.2. Estimer la valeur de la « vitesse limite » qui est la vitesse maximale atteinte par le système. À partir de quelle date  $t_0$  cette valeur est-elle atteinte ?

**2.3.** En s'appuyant sur l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur du système, déterminer la valeur  $\Delta z$  de la variation d'altitude du système pendant la phase de mouvement uniforme (entre le début de la phase où la vitesse limite est atteinte et l'atterrissement).

**2.4.** Comment l'énergie mécanique du système varie-t-elle au cours du mouvement ? Que peut-on en conclure sur les forces de frottement de l'air exercées sur le système ?

**2.5.** Déterminer la valeur de la variation d'énergie mécanique pendant la phase de mouvement uniforme.

**2.6.** En déduire la valeur de la force de frottement supposée constante pendant la phase de mouvement uniforme. Conclure quant au bilan des forces, pendant cette phase.

### 3. Allons plus loin...

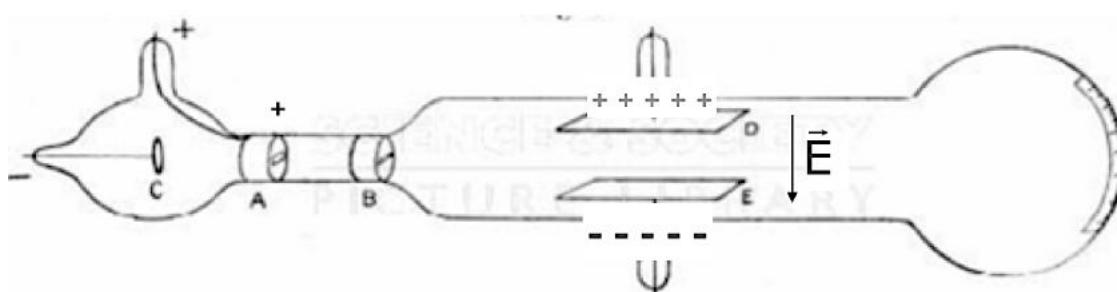
On reproduit cette expérience de chute dans un tube vertical dans lequel on fait le vide. Les conditions initiales sont identiques.

Représenter sur votre copie l'allure de l'évolution, au cours du temps, des énergies cinétique, potentielle de pesanteur et mécanique. Vous justifierez l'allure de ces courbes en donnant leurs équations horaires.

*Toutes les initiatives du candidat seront valorisées ; la démarche utilisée nécessite d'être correctement présentée.*

#### Exercice 3 La découverte de l'électron

**Document 1** : Découverte de l'électron et détermination du rapport e/m de l'électron



Joseph John Thomson, du Laboratoire Cavendish à l'Université de Cambridge, construisit un dispositif qui ressemblerait à un tube de télévision : une haute différence de potentiel entre l'anode et la cathode ionise le gaz raréfié et crée un mélange d'atomes chargés positivement et d'électrons négatifs. Ces électrons sont accélérés vers l'anode A. Un petit trou dans l'anode permet à un faisceau étroit de franchir l'anode avec une vitesse  $\vec{v}$ .

Plus loin, à l'intérieur du tube, sont disposées 2 plaques métalliques horizontales auxquelles on applique une différence de potentiel réglable  $U$  et un champ électrique  $\vec{E}$  entre les plaques. Après avoir mis en évidence que les « rayons cathodiques » étaient chargés négativement, Thomson mesure leur vitesse puis le rapport de la charge  $e$  à la masse  $m$  des particules du faisceau qui, nous le savons maintenant, sont des électrons.

**Document 2** : Trajectoire d'un électron dans un champ électrique  $\vec{E}$

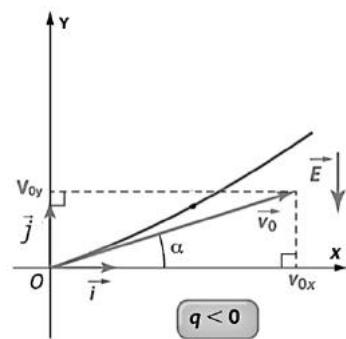
Nous allons étudier la trajectoire d'un électron de charge  $q < 0$  et de vitesse initiale  $\vec{V}_0$  dans le tube. L'axe x est l'axe du tube. Le champ électrique entre les deux plaques  $\vec{E}$  est suivant la direction de l'axe y et dans le sens opposé à y (voir figure ci-contre).

La vitesse  $\vec{V}_0$  fait un angle  $\alpha$  avec l'axe des x.

Données :

$$\|\vec{E}\| = 2,0 \times 10^4 \text{ N.C}^{-1}$$

$$\text{Masse de l'électron : } 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$



Charge d'un électron :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ Intensité de la pesanteur sur Terre :  $g = 9,81 \text{ N. kg}^{-1}$ 

1. Rappeler la deuxième loi de Newton appelée également le principe fondamental de la dynamique et faire le bilan des forces qui s'exercent sur l'électron.
2. Comparer les forces qui s'exercent sur l'électron. Que peut-on en déduire ?
3. Appliquer le principe fondamental de Newton à l'électron et en déduire l'accélération  $\vec{a}$  ( $a_x, a_y$ ) subie par l'électron entre les plaques du tube.
4. En déduire la vitesse instantanée de l'électron.
5. Déterminer l'équation horaire à savoir les variations des coordonnées  $x$  et  $y$  de l'électron en fonction de temps. On considère qu'à  $t = 0$ , l'électron se trouve à l'origine ( $x=0, y = 0$ ).
6. Déterminer l'équation cartésienne de l'électron (l'équation reliant les coordonnées  $x$  et  $y$  de l'électron).
7. Représenter l'allure de la trajectoire de l'électron entre les plaques du tube et expliquer comment Thomson a pu déterminer le rapport  $e/m$

#### Exercice 4 Élément de l'accélérateur linéaire

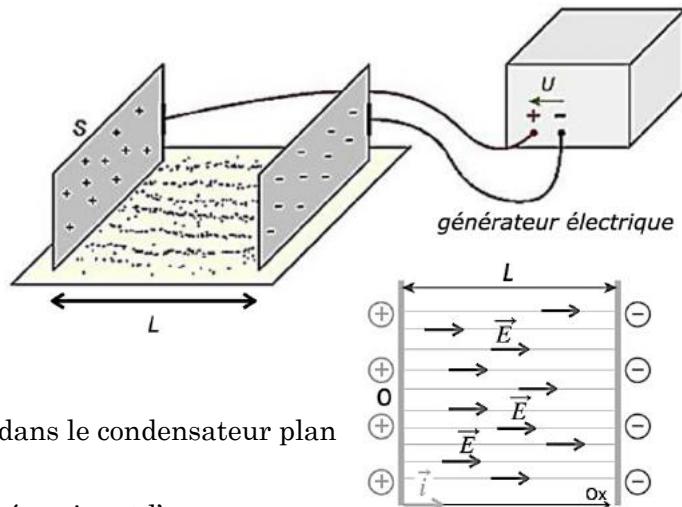
Pour accélérer une particule chargée, on utilise des champs électriques, qui exercent sur elle des forces électriques.

#### Accélération d'une particule chargée – Condensateur plan

Un condensateur plan est constitué de deux armatures conductrices planes et parallèles, séparées par un isolant.

Lorsqu'il est soumis à une tension électrique constante  $U$ , il règne entre les armatures un champ électrostatique uniforme  $\vec{E}$  :

- perpendiculaire aux armatures ;
- orienté du potentiel le plus élevé vers le plus faible (du + vers le -).



#### Étude du mouvement d'une particule

Une particule de masse  $m$  et de charge  $q > 0$  pénètre dans le condensateur plan de longueur  $L$ .

Sa vitesse initiale au point O est notée  $\vec{v}_0$  et est dirigée suivant l'axe x.

On cherche à déterminer la vitesse de sortie d'un électron au niveau de la plaque  $\ominus$ , en supposant que sa vitesse est quasi nulle au voisinage de la plaque  $\oplus$  :  $E_c(O) = 0$

#### Données :

- Charge électrique élémentaire :  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Masse d'un électron :  $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

1. Déterminer les caractéristiques du champ électrique  $\vec{E}$  entre les armatures métalliques du canon à électrons : direction, sens et norme.
2. Le champ électrique  $\vec{E}$  est lié à la tension  $U$  (exprimée en volt). Il est créé par des charges électriques présentes sur les plaques du condensateur et s'exprime en volt par mètre ( $\text{V.m}^{-1}$ ). À l'aide d'une analyse des unités proposer une relation possible entre tension  $U$  et la norme de champ électrique  $E$  dans un condensateur plan.
3. En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'électron, dans le référentiel de laboratoire supposé galiléen, montrer que la vitesse de l'électron au niveau de la plaque  $\ominus$  est donnée par :  $v = \sqrt{\frac{2exU}{m}}$

Calculer la valeur de la vitesse de l'électron au niveau de la plaque  $\ominus$ . Commenter le résultat obtenu

Exercice 5 Atterrissage du premier étage d'une fusée

Une technologie spatiale développée par une société commerciale permet de récupérer le premier étage d'une fusée après son décollage.

Le schéma ci-contre montre qu'après la séparation entre le premier et le second étage, le premier revient sur Terre pour atterrir délicatement sur une plateforme.

Cet atterrissage doit s'effectuer « en douceur », c'est-à-dire avec une valeur de la composante verticale de la vitesse inférieure à  $6 \text{ m.s}^{-1}$ .

Cet exercice se propose d'étudier le retour sur Terre du premier étage de la fusée.

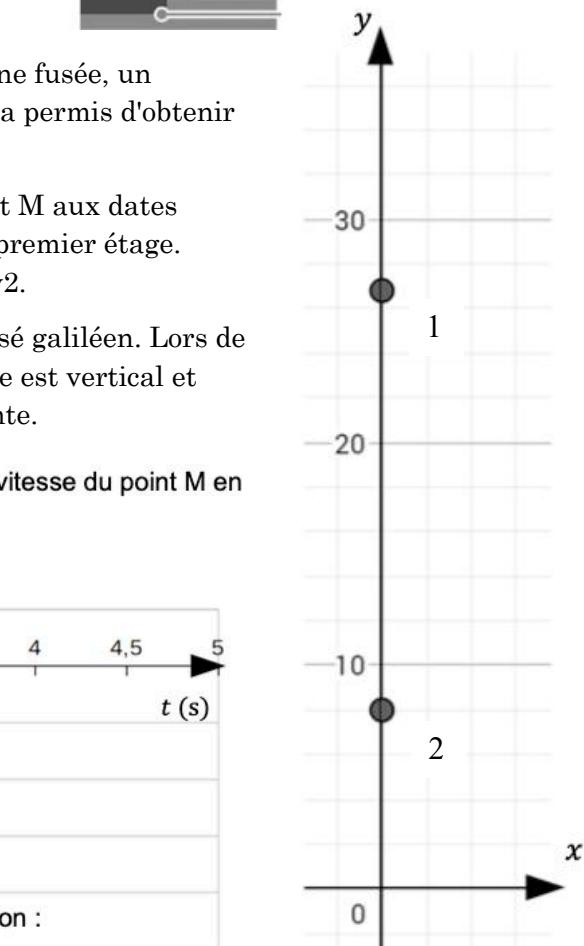
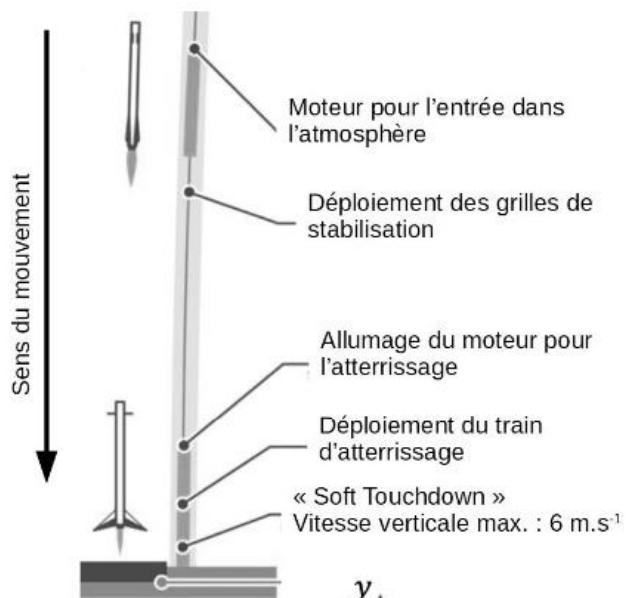
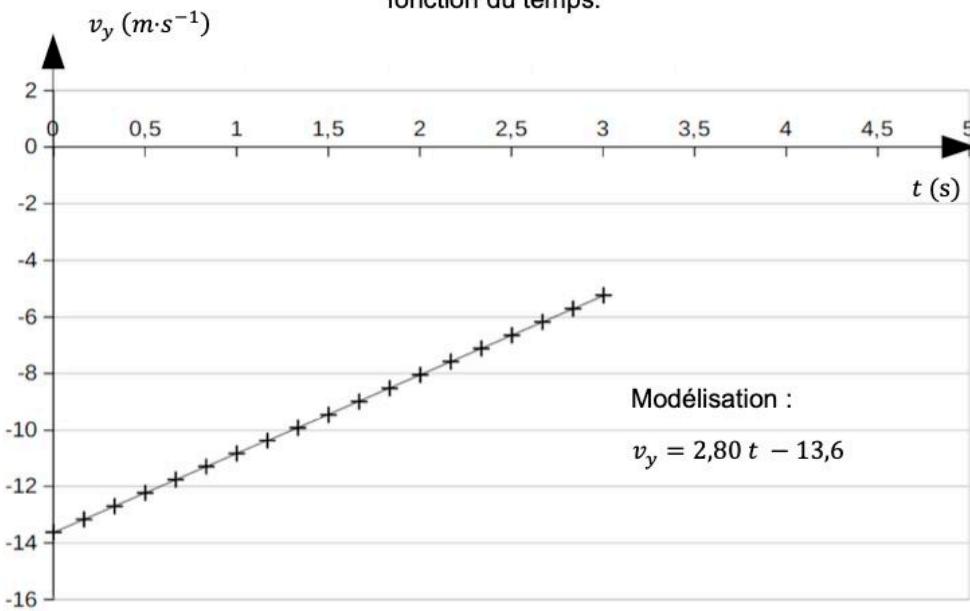
Le premier étage de la fusée chute dans l'atmosphère terrestre depuis une altitude de plusieurs dizaines de kilomètres. Pour ralentir sa chute, il utilise son moteur. On étudie le mouvement de cet étage à proximité du sol après le déploiement du train d'atterrissage. Lors de cette dernière phase, sa masse est considérée comme constante.

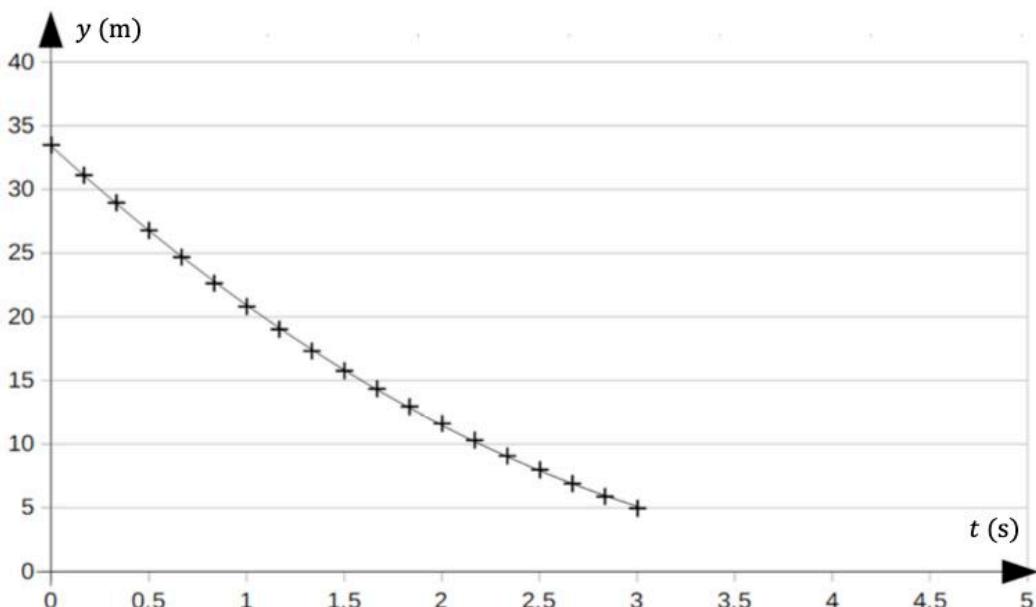
Disposant d'une vidéo de l'atterrissage du premier étage d'une fusée, un pointage des positions d'un point M du fusée a été réalisé et a permis d'obtenir les graphiques 1 et 2 ci-dessous.

On a représenté ci-contre deux positions successives du point M aux dates  $t_1 = 0,50 \text{ s}$  et  $t_2 = 2,50 \text{ s}$  lors de la phase de l'atterrissage du premier étage. Celui-ci se trouve alors respectivement aux altitudes  $y_1$  et  $y_2$ .

Le mouvement est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Lors de la dernière phase de l'atterrissage, le mouvement du système est vertical et s'effectue selon l'axe  $0y$  orienté suivant la verticale ascendante.

Graphique 1. Évolution de la coordonnée verticale  $v_y$  du vecteur vitesse du point M en fonction du temps.



Graphique 2. Évolution de l'altitude  $y$  du point M en fonction du temps.

1. Représenter sur un schéma le vecteur vitesse du point M aux instants  $t_1$  et  $t_2$  en utilisant l'échelle de représentation suivante : 1 cm sur votre feuille correspond à  $6,0 \text{ ms}^{-1}$ .
2. Déterminer la valeur de l'accélération et commenter le signe de la projection de l'accélération suivant Oy. Qualifier le mouvement.
3. Représenter, sur un schéma, les forces qui modélisent les principales actions qui s'exercent sur le premier étage de la fusée étudiée de manière à rendre compte du signe de la projection de l'accélération suivant Oy. Justifier.
4. En exploitant les graphiques 1 et 2, montrer que l'équation horaire  $y = f(t)$  du mouvement du point M peut s'écrire :

$$y = 140 t^2 - 13,6 t + 33 \text{ avec } y \text{ en m et } t \text{ en s.}$$

5. Déterminer la valeur de la vitesse du système lorsqu'il touche le sol en admettant que l'accélération ne varie pas sur les derniers mètres.
6. Préciser si l'atterrissement s'effectue « en douceur ».