Chapitre 8 : Lois de la dynamique newtonienne

Après avoir présenté au chapitre 7 la cinématique, qui est l'étude descriptive des mouvements, indépendamment de leurs causes, ce chapitre présente les principes de la dynamique, qui fait le lien entre le mouvement d'un système et les causes de ce mouvement, c'est-à-dire les forces exercées sur le système.

Plan du cours

À savoir	auto-éval.
Définir la masse et le centre de masse d'un système.	☺ ☹
Définir la quantité de mouvement d'un point matériel et d'un système de points.	☺ ☹
Énoncer la 1re loi de Newton (principe d'inertie) et définir un référentiel galiléen.	☺ ☹
Définir la notion de force.	☺ ☹
Énoncer la 3e loi de Newton (principe d'action-réaction).	☺ ☹
Énoncer la 2e loi de Newton (principe fondamental de la dynamique).	☺ ☹
Définir l'équilibre d'un système.	☺ ☹
Définir le champ de pesanteur au voisinage d'une planète.	☺ ☹
Donner le modèle linéaire d'une force de frottement fluide.	☺ ☹
Définir la tension d'un fil.	☺ ☹
Présenter le pendule simple.	☺ ☹

À savoir faire	auto-éval.
Justifier qualitativement la position du centre de masse d'un système.	☺ ☹
Utiliser la relation entre la quantité de mouvement d'un système et la vitesse de son centre de masse.	☺ ☹
Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens.	☺ ☹
Discuter qualitativement du caractère galiléen d'un référentiel donné pour le mouvement étudié.	☺ ☹
Établir un bilan des forces sur un système ou sur plusieurs systèmes en interaction et les représenter sur un schéma.	☺ ☹
Utiliser la 2e loi de Newton.	☺ ☹
Exploiter une équation différentielle sans la résoudre analytiquement (ODG, vitesse limite, écriture adimensionnée, utilisation de résultats obtenus par simulation numérique).	☺ ☹
Établir et exploiter les équations horaires du mouvement.	☺ ☹
Établir l'équation de la trajectoire.	☺ ☹
Établir l'équation du mouvement du pendule simple.	☺ ☹
Justifier le caractère harmonique des oscillations de faible amplitude.	☺ ☹
Mettre en œuvre un protocole expérimental permettant d'étudier une loi de force à l'aide d'un microcontrôleur ou de l'analyse d'un mouvement enregistré	☺ ☹
Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides	☺ ☹

I Éléments cinétiques d'un système

I.1 Masse

Définition

Masse inertielle : C'est la grandeur, notée m et mesurée en kg, qui caractérise la capacité d'un corps à résister à sa mise en mouvement, c'est un scalaire positif, d'autant plus grand que le corps est inerte. C'est une grandeur extensive [a] et intrinsèque [b].

a. additive
b. liée uniquement au corps considéré

Remarques

- En pratique, la mesure de la masse s'obtient à l'aide d'une balance en utilisant la mesure du poids du corps : $\overrightarrow{P} = m\overrightarrow{g}$, où m est la **masse pesante**. C'est le principe d'équivalence.
- Pour un système S constitué de N points matériels M_i, de masses m_i, on note m_{tot} la masse totale du système :

$$m_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N} m_i$$

- La masse d'un système fermé (contenant toujours les mêmes points matériels) reste constante.

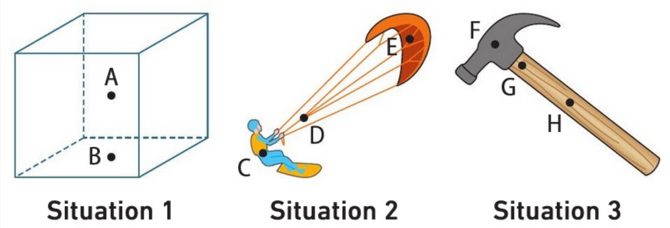
Définition

Centre de masse : On appelle centre de masse d'un système de points matériels M_i de masse m_i le barycentre des points affectés de leurs masses, on le note G :

$$\overrightarrow{OG} = \frac{1}{m_{\text{tot}}} \sum_{i=1}^{N} m_i \overrightarrow{OM_i} \qquad \text{ou} \qquad \sum_{i=1}^{N} m_i \overrightarrow{GM_i} = \overrightarrow{0}$$

Application directe

Quel point représente le centre de masse du système ?
a) Situation 1 : système { cube homogène } A
b) Situation 2 : système { voile } E
c) Situation 3 : système { kitesurfeur + planche + voile } D
d) Situation 3 : système { marteau } G



I.2 Quantité de mouvement

Définition

Quantité de mouvement : Pour un point M de masse m et de vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel $\mathscr{R}$, la quantité de mouvement est définie par le vecteur :

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

m = masse du système en kg
$\vec{v}$ = vitesse du point matériel M dans le référentiel $\mathscr{R}$, v exprimé en m·s^{-1}
$\vec{p}$ = quantité de mouvement de M dans le référentiel $\mathscr{R}$, p exprimé en kg·m·s^{-1}

Remarques

- Contrairement à la masse, la quantité de mouvement dépend du référentiel d'étude.
- La quantité de mouvement d'un système de points matériels, notée $\overrightarrow{p_{\text{tot}}}$, est égale à la somme des quantités de mouvement de chacun des points qui le constituent :

$$\overrightarrow{p_{\text{tot}}} = \sum_{i=1}^{N} m_i \vec{v_i}$$

Elle peut s'exprimer en utilisant le centre de masse G, affecté de la masse m_{tot} et animé de la vitesse $\overrightarrow{v_G}$ dans le référentiel $\mathscr{R}$:

$$\overrightarrow{p_{\text{tot}}} = m_{\text{tot}}\overrightarrow{v_G}$$

II Forces exercées sur un système

II.1 Notion de force

Définitions

Action mécanique : On appelle action mécanique toute action, exercée par un système extérieur et pouvant modifier, provoquer ou empêcher le mouvement d'un système, ou le déformer.

Force : En mécanique classique, une action mécanique exercée sur un système est modélisée mathématiquement par un vecteur appelé force. Une force est caractérisée par :
— son point d'application
— sa direction
— son sens (qui traduit le sens de l'action mécanique)
— son intensité (la norme du vecteur) exprimée en newton (N)

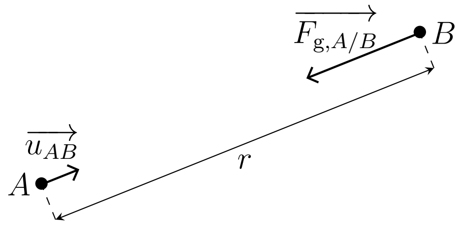
Remarques

- Les actions mécaniques peuvent être à distance (poids, action exercée par un aimant) ou de contact (frottement, réaction du support).
- Les forces ne dépendent pas du référentiel et sont additives, c'est-à-dire un système soumis à deux forces $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ est soumis à la résultante $\vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2}$

II.2 Forces exercées à distance

♥ Force d'interaction gravitationnelle $\overrightarrow{F_g}$

Dans l'Univers, tous les corps ayant une masse s'attirent : c'est l'interaction gravitationnelle. On appelle « force d'interaction gravitationnelle » $\overrightarrow{F_{g,A/B}}$ la force qui modélise cette interaction.



$$\overrightarrow{F_{g,A/B}} = -G \cdot \frac{m_A \cdot m_B}{r^2} \overrightarrow{u_{AB}}$$

G	$=$	constante de gravitation universelle
	$=$	$6{,}67 \times 10^{-11}\,\mathrm{N{\cdot}m^2{\cdot}kg^{-2}}$
m_A et m_B	$=$	masses des corps A et B, en kg
$\vec{u}$	$=$	vecteur unitaire (= dont la norme vaut 1) dirigé de A vers B

Remarque

- Au voisinage d'une planète, la force gravitationnelle est appelée **poids**.

Application directe

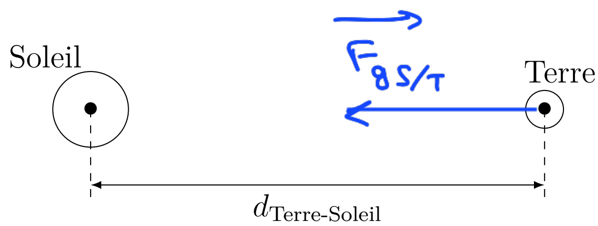
Déterminer l'intensité de la force gravitationnelle qu'exerce le Soleil sur la Terre. Représenter cette force sur le schéma.

Données : $m_{\text{Terre}} = 5{,}97 \times 10^{24}$ kg ; $m_{\text{Soleil}} = 1{,}99 \times 10^{30}$ kg ; $d_{\text{Terre-Soleil}} = 149{,}6$ millions de km

Echelle : 1 cm $\leftrightarrow$ 1×10^{22} N.

norme :

$$F_{gS/T} = \frac{G\, m_{Terre}\, m_{soleil}}{d_{Terre-Soleil}^{\;2}}$$



AN : $F_{gS/T} = 3{,}54 . 10^{22}$ N

soit 3,54 cm sur le schéma

♥ Le poids $\vec{P}$

Le poids $\vec{P}$ d ?un objet se trouvant au voisinage de la Terre est défini par :

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

avec

m	$=$	masse de l'objet en kg
$\vec{g}$	$=$	champ de pesanteur (sa norme s'exprime en $\mathrm{N{\cdot}kg^{-1}}$)

Caractéritiques de $\vec{P}$:

- direction : verticale
- sens : vers le bas
- norme $P = m \times g$

Application directe

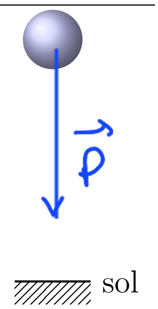
Déterminer les caractéristiques de la force poids d'un ballon de foot de masse $m = 450$ g et représenter cette force sur le schéma ci-dessous (échelle : 1,0 cm $\leftrightarrow$ 2,0 N).

norme : $P = mg$

AN : $P = 0,450 \times 9,81$

$= 4,41$ N

soit 2,2 cm sur le schéma



♥ Force d'interaction électrostatique $\vec{F_e}$

Entre deux corps immobiles électriquement chargés, il existe une interaction électrostatique, qui peut être attractive ou répulsive selon les signes des charges électriques. La force qui modélise cette interaction est la « force électrostatique » $\vec{F_e}$, donnée par la **loi de Coulomb** :

$$\overrightarrow{F_{e,A/B}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_A\,q_B}{r^2}\overrightarrow{u_{AB}}$$

avec :

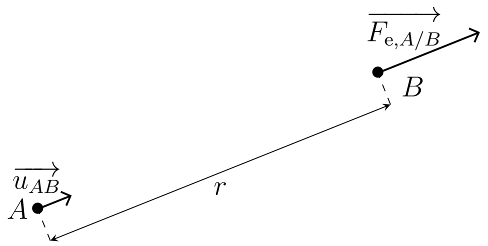
ε_0 = permittivité du vide $= 8{,}85 \times 10^{-12}\,\mathrm{F{\cdot}m^{-1}}$

q_A et q_B = charges électriques des corps A et B, en C

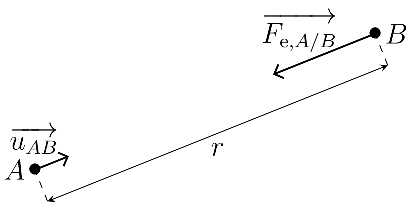
r = distance AB en m

$\overrightarrow{u_{AB}}$ = vecteur unitaire dirigé de A vers B

- si q_A et q_B sont de même signe :



- si q_A et q_B sont de signe opposé :



Application directe

Déterminer l'intensité de la force électrostatique qu'exerce une bille portant la charge électrique $q_1 = 5\,\mathrm{nC}$ sur une autre bille portant la charge $q_2 = -15\,\mathrm{nC}$ située à une distance de 20 cm. Représenter cette force sur un schéma en utilisant les échelles : 1 cm $\leftrightarrow$ 5 cm pour les distances, 1 cm $\leftrightarrow$ 10^{-5} N pour les forces.

norme : $F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$

$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{5.10^{-9} . 15.10^{-9}}{(0,20)^2} = 1,7 . 10^{-5}$ N

soit 1,7 cm sur le schéma pour $\vec{F}$ et 4 cm entre les 2 charges.

La force est attractive car q_1 et q_2 sont de signes opposés.

II.3 Forces de contact

♥ Réaction du support $\vec{R}$

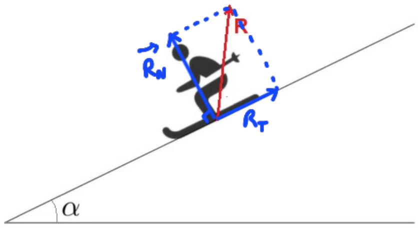
Si le système étudié est en contact avec un solide, il subit une action mécanique de sa part. On la modélise par une force appelée **Réaction du support** $\vec{R}$, qui a 2 composantes :

— La réaction normale, notée $\overrightarrow{R_N}$, qui est perpendiculaire à la surface de contact. Elle modélise le fait que le système ne « s'enfonce » pas dans le support.

— La réaction tangentielle $\overrightarrow{R_T}$, qui est parallèle à la surface de contact. Elle modélise les frottements entre les solides (elle n'est pas toujours présente).

Application directe

Représenter les composantes normale et tangentielle de la réaction de la piste sur le skieur.



Force de frottement fluide

Un corps en mouvement dans un fluide subit une force de frottement fluide (ou force de trainée), qui a pour direction celle du mouvement, qui est opposée au mouvement et qui est d'autant plus importante que la vitesse du corps est importante.
Il n'existe pas de « formule théorique » pour la force de frottement fluide. Des études expérimentales ont conduit à deux expressions pour la force de frottement fluide selon la vitesse du corps :

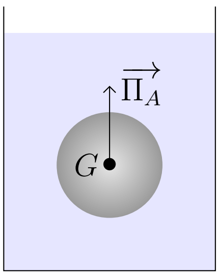
— à « faible vitesse » : $\overrightarrow{f} = -k_1\overrightarrow{v}$, avec $k_1 > 0$;
— à « vitesse élevée » : $\overrightarrow{f} = -k_2\left\|\overrightarrow{v}\right\|\overrightarrow{v}$, avec $k_2 > 0$.

Les coefficients k_1 et k_2 sont déterminés expérimentalement ; ils dépendent du fluide et de l'objet en mouvement (forme et matière).

Poussée d'Archimède $\overrightarrow{\Pi_A}$

Tout corps au repos ou en mouvement dans un fluide subit de la part de ce fluide une action mécanique, la **poussée d'Archimède** (qui est égale à la résultante des forces de pression s'exerçant dessus). On la note $\overrightarrow{\Pi_A}$, et elle est égale à l'opposé du poids du fluide déplacé :

$$\overrightarrow{\Pi_A} = -m_{\text{fluide déplacé}} \times \overrightarrow{g}$$



Caractéristiques de la poussé d'Archimède :

— point d'application : centre de masse du fluide déplacé G ;
— direction : verticale du lieu considéré (droite passant par G et le centre de la Terre)
— sens : du centre de la Terre vers G (« vers le haut »)
— norme : égale au poids du fluide déplacé $\left\|\overrightarrow{\Pi_A}\right\| = m_{\text{fluide déplacé}} \times g$

Dans le cas où le fluide est homogène (corps complètement immergé dans le fluide, et pas entre deux fluides), la poussée d'Archimède s'écrit :

$$\overrightarrow{\Pi_A} = -\rho_{\text{fluide}} V_{\text{fluide déplacé}} \times \overrightarrow{g}$$

Remarque

Quand faut-il prendre en compte la poussée d'Archimède ?
La poussée d'Archimède s'exerçant dans la même direction que le poids et dans le sens opposé, il faut comparer les normes de ces deux forces : $\dfrac{\Pi_A}{P} = \dfrac{\rho_{\text{fluide}} \times V_{\text{fluide déplacé}} \times g}{\rho_{\text{système}} \times V_{\text{système}} \times g}$

Pour un système totalement immergé dans le fluide $V_{\text{système}} = V_{\text{fluide déplacé}}$, on a :

$$\frac{\Pi_A}{P} = \frac{\rho_{\text{fluide}}}{\rho_{\text{système}}}$$

La poussée d'Archimède peut donc être négligée devant le poids lorsque la masse volumique du fluide est négligeable devant la masse volumique du système. Ainsi :

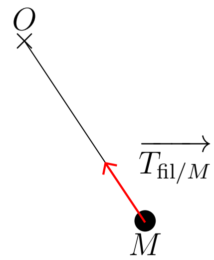
— pour un solide plein dans l'air la poussée d'Archimède peut être négligée ;

— pour un solide vide (par ex. ballon de baudruche) dans l'air ou un solide quelconque dans un liquide, la poussée d'Archimède ne peut pas être négligée.

♥ Tension d'un fil $\overrightarrow{T}$

Un fil, infiniment souple, tendu, exerce sur un objet accroché à une de ses extrémités une force de contact, appelée **tension du fil** et notée $\overrightarrow{T}$, dont les caractéristiques sont :

— direction : celle du fil ;
— sens : d'une extrémité du fil vers l'autre ;
— norme : T dépend des autres forces mises en jeu et du mouvement, on la détermine a posteriori une fois le mouvement déterminé.
Pour un fil idéal, inextensible et de masse négligeable, la norme $\left\|\overrightarrow{T}\right\|$ est uniforme le long du fil.



Si le fil n'est pas tendu, la tension est nulle.

III Les 3 lois de Newton

III.1 Première loi : principe d'inertie

♥ 1re loi de Newton : Principe d'inertie

Énoncé du principe d'inertie – définition des référentiels galiléens : Il existe une classe privilégiée de référentiels, appelés **référentiels galiléens**, dans lesquels tout point matériel isolé ou pseudo-isolé est animé d'un mouvement rectiligne et uniforme.

Tous les référentiels galiléens sont en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres.

☞ Exemples

— Le **référentiel terrestre** peut être considéré comme galiléen pour des expériences de durées très inférieures à 24h et sur des distances très inférieures au rayon de la Terre. Il sera utilisé pour étudier le mouvement d'objets à la surface (ou à proximité) de la Terre.
— Le **référentiel géocentrique** peut être considéré comme galiléen pour des expériences de durées très inférieures à 1 année. Il sera utilisé pour étudier le mouvement des satellites autour de la Terre. Le phénomène des marées s'explique par la nature non galiléenne du référentiel géocentrique.
— Le **référentiel héliocentrique** peut être considéré comme galiléen pour des expériences de durées allant jusqu'à plusieurs millions d'années. Pour l'instant, aucune expérience n'a mis en évidence le caractère non galiléen de ce référentiel.

III.2 Deuxième loi : principe fondamental de la dynamique

♥ 2e loi de Newton : Principe fondamental de la dynamique

Soit un point matériel M de masse m dont on étudie le mouvement dans le référentiel $\mathscr{R}_g$ supposé galiléen à l'échelle de l'expérience et qui est soumis à des actions mécaniques extérieures de résultante $\sum \overrightarrow{F_{\text{ext}}}$.
Le principe fondamental de la dynamique s'écrit :

$$\left(\frac{\mathrm{d}\overrightarrow{p(M/\mathscr{R})}}{\mathrm{d}t}\right)_{/\mathscr{R}} = \sum \overrightarrow{F_{\text{ext}}} \quad \Leftrightarrow \quad \left(\frac{\mathrm{d}\left(m\overrightarrow{v(M/\mathscr{R})}\right)}{\mathrm{d}t}\right)_{/\mathscr{R}} = \sum \overrightarrow{F_{\text{ext}}}$$

Pour un **système fermé** de masse m constante, on peut l'écrire : $m\overrightarrow{a(M/\mathscr{R}_g)} = \sum \overrightarrow{F_{\text{ext}}}$

III.3 Troisième loi : principe des actions réciproques

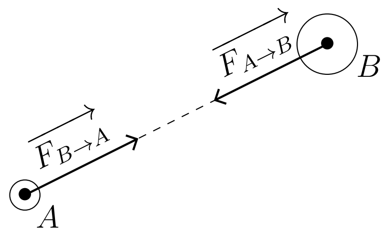
♥ 3e loi de Newton : Principe des actions réciproques

Soient deux corps A et B en interaction :

— le corps A exerce sur B la force $\overrightarrow{F_{A\to B}}$;
— le corps B exerce sur A la force $\overrightarrow{F_{B\to A}}$.

Les forces $\overrightarrow{F_{A\to B}}$ exercée par A sur B et $\overrightarrow{F_{B\to A}}$ exercée par B sur A sont :

- portées par la droite (AB)
- opposées : $\overrightarrow{F_{B\to A}} = -\overrightarrow{F_{A\to B}}$



IV Étude de mouvements dans un champ de pesanteur

IV.1 Méthode pour résoudre un exercice de mécanique

☆ Méthode

Pour résoudre un exercice de mécanique :

① Définir le **système** (= l'objet dont on étudie le mouvement).
② Préciser le **référentiel d'étude** $\mathscr{R}_g$, supposé galiléen à l'échelle de l'expérience.
③ Choisir le **système de coordonnées adapté** à la description du mouvement.
④ Faire un **grand schéma clair** sur lequel vous représentez le système, le référentiel $\mathscr{R}_g$ et la base choisie.
⑤ Définir les notations nécessaires associées aux grandeurs dont seules les valeurs sont fournies (par exemple : m pour la masse, v_0 pour la vitesse initiale).
⑥ Faire un **bilan des actions mécaniques** précis et complet : les nommer et en donner leurs expressions. **Représenter toutes les forces** sur le schéma.
⑦ Écrire « On applique le Principe Fondamental de la Dynamique au système dans le référentiel ...... galiléen ». *(D'autres méthodes seront vues dans la suite du cours de mécanique)*
⑧ **Projeter les équations vectorielles** dans la base associée au système de coordonnées choisi pour repérer M.
⑦ Déterminer l'**expression littérale** de la grandeur demandée (force, équations horaires, équation de la trajectoire...) en veillant à **l'homogénéité**. Faire l'application numérique si elle est demandée, sans omettre l'**unité**.

IV.2 Chute en absence de frottements (= chute libre)

Exercice de cours (A)

À $t = 0$, un ballon de football, modélisé par un point matériel M de masse $m = 400\,\text{g}$, est lancé avec une vitesse initiale $\overrightarrow{v_0}$ de norme $v_0 = 25\,\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et faisant un angle $\psi = 30°$ avec l'horizontale. On néglige les frottements de l'air.

Q1. Définir le système, le référentiel d'étude et le choix du système de coordonnées choisi pour le repérage.

Q2. Schématiser la situation.

Q3. Que peut-on dire du vecteur accélération au cours du mouvement ?

Q4. Établir, par intégrations successives, les équations horaires du mouvement : $\begin{cases} x(t) & = \\ y(t) & = \\ z(t) & = \end{cases}$

Q5. Représenter les allures de $v_x(t) = \dot{x}(t)$, $v_z(t) = \dot{z}(t)$, $x(t)$ et $z(t)$.

Q6. Établir l'équation cartésienne $z(x)$ de la trajectoire. Dessiner l'allure de la trajectoire. Représenter dessus également le vecteur vitesse et le vecteur accélération à différents instants.

Q7. Déterminer la portée du tir, c'est-à-dire la distance horizontale par rapport à sa position initiale à laquelle le ballon tombe au sol. Pour quel angle est-elle maximale ?

Q8. Déterminer la flèche du tir, c'est-à-dire la hauteur maximale atteinte par le ballon.

IV.3 Chute en présence de frottements

Exercice de cours (B)

On s'intéresse à la chute d'un grêlon que l'on considère sphérique de rayon $R = 10\,\text{mm}$ et de masse $m = 3{,}9\,\text{g}$. Son mouvement est repéré par la position de son centre M. Nous allons étudier l'influence des frottements sur son mouvement dans le champ de pesanteur. On étudie le grêlon dans le référentiel terrestre supposé galiléen à l'échelle de la chute. On choisit (Oz) la verticale ascendante et (Oxy) le plan horizontal, le repère $(Oxyz)$ étant lié au référentiel terrestre.
À $t = 0$, le grêlon a une vitesse nulle et il se trouve au-dessus de O à une altitude $h = 1{,}0\,\text{km}$.
Sur le site de Météo France, il est indiqué qu'un tel grêlon atteint le sol avec une vitesse de $75\,\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

En l'absence de frottements :

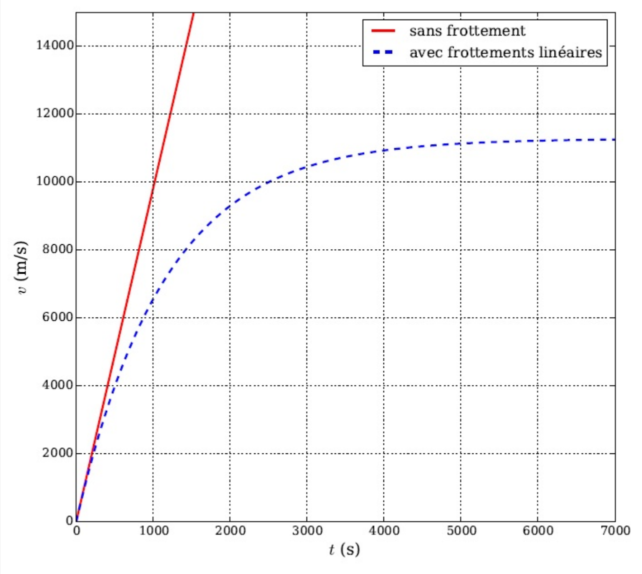
Q1. Déterminer la vitesse à laquelle il arrive au sol et la durée mise pour y arriver. Commenter les valeurs numériques : la norme du vecteur vitesse, notée v, en fonction de t et la composante du vecteur vitesse selon $\overrightarrow{u_z}$, notée v_z, en fonction de z.

Traînée linéaire :
Dans un premier temps, on considère que la force de frottement fluide s'écrit $\overrightarrow{f} = -6\pi\eta R\overrightarrow{v}$, avec R le rayon du grêlon et η la viscosité du fluide dans lequel se produit le mouvement, on donne pour l'air $\eta_{\text{air}} = 1{,}7 \times 10^{-5}$ unité SI.

Q2. Quelle est l'unité SI de η ?

Q3. Établir l'équation différentielle vérifiée par la composante verticale v_z de la vitesse du grêlon. Qualifier cette équation différentielle. Pour quel système a-t-on déjà rencontré une équation différentielle de ce type ?

Q4. À l'aide de l'équation précédente, exprimer la vitesse limite $v_{\text{lim},1}$ atteinte par M et l'ordre de grandeur de la durée Δt_1 mise par M pour atteindre sa vitesse limite.
Faire les AN pour $v_{\text{lim},1}$ et Δt_1.
Commenter les valeurs numériques et les courbes (v en fonction de t et v_z en fonction de z).



Traînée quadratique

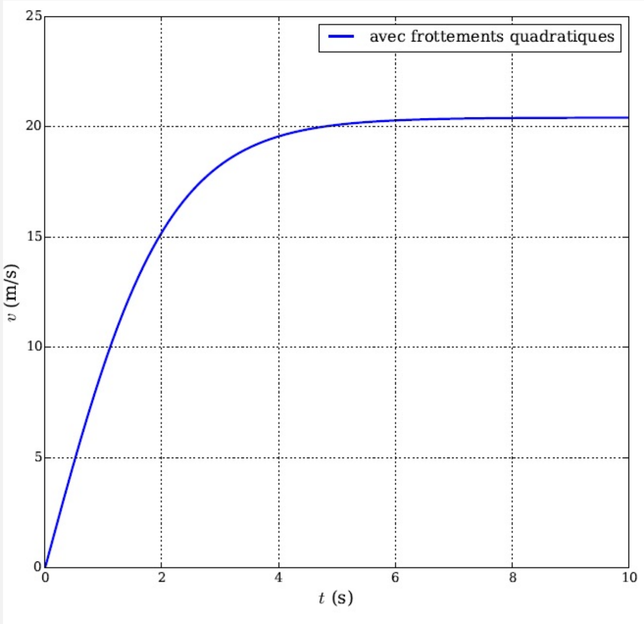
On considère maintenant la modélisation des frottements quadratiques $\overrightarrow{f} = -\dfrac{1}{2}\rho C_x \pi R^2 \|\overrightarrow{v}\|\overrightarrow{v}$, avec R le rayon du grêlon, C_x un coefficient adimensionné proche de 0,45 pour une sphère et ρ la masse volumique du fluide dans lequel se produit le mouvement, on a $\rho_{\text{air}} = 1{,}3\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Q5. Vérifier que l'expression de la force de frottement est homogène.

Q6. Établir l'équation différentielle vérifiée par la composante v_z (ou $\dot{z}$) de la vitesse selon (Oz) du grêlon. *On fera attention aux signes de v_z et $\|\overrightarrow{v}\|$.*
Qualifier cette équation différentielle.

Q7. Sans résoudre l'équation différentielle, exprimer puis calculer la vitesse limite $v_{\text{lim},2}$ atteinte par le grêlon. Commenter.

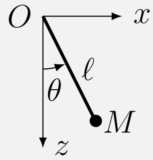
Q8. Commenter la courbe $v = f(t)$ obtenue (v est la norme de la vitesse). Quelle durée Δt_2 met le grêlon pour atteindre sa vitesse limite ?



IV.4 Étude du mouvement du pendule simple

Exercice de cours ©

On considère un pendule simple constitué d'un point M de masse m accroché à l'extrémité d'un fil inextensible, sans masse et sans rigidité, dont l'autre extrémité O est fixe dans le référentiel $\mathscr{R}_g$ du laboratoire supposé galiléen.
On néglige les frottements dus à l'air.



Q1. Quel est le mouvement du point M ? Quel est le système de coordonnées adapté pour cette étude ? Le représenter sur un schéma.

Q2. Faire le bilan des forces et représenter les forces sur le schéma précédent.

Q3. Appliquer le principe fondamental de la dynamique.

Q4. Sur quel vecteur de la base choisie faut-il projeter le PFD afin d'en déduire l'équation différentielle du mouvement ?
Établir l'équation différentielle du mouvement. Quelle est sa nature ?

On se place, dans la suite, dans le cadre des mouvements de petite amplitude : θ reste très petit devant 1 rad.

Q5. Ré-écrire l'équation différentielle dans ce cas. À quel type de système déjà étudié cette année l'équation différentielle correspond-elle ?

Q6. La résoudre avec les conditions initiales suivantes : $\theta(0) = \theta_0$ et $\overrightarrow{v}(0) = \overrightarrow{0}$.