

Deuxième loi de Newton et mouvement dans un champ uniforme

COURS • P09 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	2
Exemples résolus	6
Méthodes et pièges	7
Vers le PASS	8
Exercices	8
Corrigés	9

Ce que tu dois savoir faire

- Définir le centre de masse d'un système et justifier qu'on puisse modéliser le système par ce point.
- Citer les conditions pour qu'un référentiel soit galiléen et choisir un référentiel adapté (terrestre, géocentrique, héliocentrique).
- Énoncer et utiliser la deuxième loi de Newton, $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$, et la relier à la variation de la quantité de mouvement.
- Mener la démarche complète : système, référentiel, bilan des forces, loi de Newton, projection, intégration, conditions initiales.
- Établir les équations horaires et l'équation de la trajectoire d'un projectile en chute libre dans un champ de pesanteur uniforme.
- Calculer la flèche, la durée de vol et la portée d'un tir, et discuter l'influence de l'angle de tir.
- Établir le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme, en justifiant que son poids est négligeable.
- Exprimer le champ entre deux plaques, $E = U/d$, et calculer la déviation d'un faisceau.
- Décrire le principe d'un accélérateur linéaire et calculer la vitesse acquise sous une tension U .
- Mener un bilan énergétique (théorème de l'énergie cinétique, conservation de l'énergie mécanique) et le comparer à la résolution par la loi de Newton.

Cours

1. Système, centre de masse, référentiel galiléen

Centre de masse. Tout système matériel possède un point particulier, son **centre de masse** G , qui est le barycentre des masses de ses parties. Pour un objet homogène possédant un centre de symétrie (boule, cube, disque), G est ce centre. Le mouvement de G est le plus simple de tous les points du système : c'est lui que décrivent les lois de Newton. Un marteau lancé en tournoyant a des points aux trajectoires compliquées, mais son centre de masse décrit une parabole.

On modélise donc le système par un point matériel de masse m situé en G .

Référentiel galiléen. Un référentiel est **galiléen** si le principe d'inertie (première loi de Newton) y est vérifié : un système isolé ou pseudo-isolé ($\Sigma \vec{F} = 0$) y est au repos ou en mouvement rectiligne uniforme. Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui aussi galiléen.

En pratique :

- le **référentiel terrestre** est considéré comme galiléen pour des mouvements de courte durée (quelques minutes) et de faible étendue ;
- le **référentiel géocentrique** est utilisé pour les satellites de la Terre ;
- le **référentiel héliocentrique** est utilisé pour les planètes.

Une voiture qui freine ou un manège qui tourne ne sont pas des référentiels galiléens : les lois de Newton ne s'y appliquent pas telles quelles.

Rappel des trois lois de Newton :

- première loi (principe d'inertie) : $\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{constant}$, dans un référentiel galiléen ;
- deuxième loi : objet de ce chapitre ;
- troisième loi (actions réciproques) : si A exerce sur B la force $\vec{F}_{A/B}$, alors B exerce sur A la force $\vec{F}_{B/A} = -\vec{F}_{A/B}$, de même droite d'action.

2. La deuxième loi de Newton

Quantité de mouvement. La quantité de mouvement d'un système de masse m dont le centre de masse a la vitesse $\vec{v}_G$ est $\vec{p} = m \cdot \vec{v}_G$, en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Énoncé. Dans un référentiel galiléen, la somme des forces extérieures appliquées à un système est égale à la dérivée de sa quantité de mouvement :

$$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = d\vec{p}/dt$$

Pour un système de **masse constante**, $d\vec{p}/dt = m \cdot d\vec{v}_G/dt$, d'où la forme utilisée en Terminale :

$$\Sigma \vec{F}_{\text{ext}} = m \cdot \vec{a}_G \text{ (forces en newtons N, masse en kg, accélération en } \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \text{)}$$

Ce que dit cette loi.

- Les forces ne déterminent pas la vitesse, mais sa variation : l'accélération a la direction et le sens de la somme des forces, pas forcément ceux du mouvement. Un ballon qui monte subit une force vers le bas.

- À force égale, un objet plus massif accélère moins : la masse mesure l'inertie.
- Le principe d'inertie est un cas particulier : si $\Sigma \vec{F} = 0$, alors $\vec{a} = 0$ et $\vec{v}$ est constant.

Cette loi relie la dynamique (les forces) à la cinématique (le chapitre précédent) : connaissant les forces, on obtient $\vec{a}$, puis par intégration $\vec{v}$ et OM .

Démarche de résolution (à appliquer systématiquement) :

Démarche newtonienne

1. définir le système et le référentiel galiléen
2. faire le bilan des forces extérieures
3. appliquer $\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$ et exprimer $\vec{a}$
4. projeter sur les axes du repère
5. intégrer avec les conditions initiales
6. exploiter les équations horaires

Forces usuelles : poids $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ (vertical, vers le bas, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ en France), réaction d'un support, tension d'un fil, frottements, force électrique $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, force de gravitation (chapitre suivant).

Exemple court : une cabine d'ascenseur de masse 500 kg monte avec une accélération de $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ dirigée vers le haut. Axe vertical vers le haut : $T - m \cdot g = m \cdot a$, donc $T = m(g + a) = 500 \times 10,81 \approx 5,4 \times 10^3 \text{ N}$. Le câble tire plus que le poids, ce qui fait accélérer la cabine vers le haut.

3. Chute libre dans un champ de pesanteur uniforme

Hypothèses. Un projectile de masse m est lancé depuis un point O , avec une vitesse initiale $\vec{v}_0$ faisant un angle α avec l'horizontale. On étudie son centre de masse dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On suppose que le projectile n'est soumis qu'à son poids : on néglige les frottements de l'air et la poussée d'Archimède. C'est la **chute libre**. Le champ de pesanteur $\vec{g}$ est **uniforme** dans la zone étudiée (même direction, même sens, même valeur en tout point), ce qui est valable sur des distances faibles devant le rayon terrestre.

Accélération. Deuxième loi : $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$, donc :

$\vec{a} = \vec{g}$: en chute libre, l'accélération ne dépend pas de la masse.

Repère. Axe (Ox) horizontal dans le plan du tir, axe (Oz) vertical vers le haut, origine au point de lancement (ou au sol, à la hauteur h sous le point de lancement). Le mouvement a lieu dans le plan vertical contenant $\vec{v}_0$ (aucune force ni vitesse initiale hors de ce plan).

Coordonnées et intégration. $\vec{a} = \vec{g}$ pour coordonnées $a_x = 0$ et $a_z = -g$. Conditions initiales : $v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha$, $v_{0z} = v_0 \cdot \sin \alpha$; $x(0) = 0$, $z(0) = h$.

En intégrant une première fois :

$$v_x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha ; v_z(t) = -g \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$$

En intégrant une seconde fois :

$$x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

$$z(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t + h$$

Le mouvement horizontal est **uniforme** (aucune force horizontale) ; le mouvement vertical est **uniformément varié**.

Équation de la trajectoire. Si $\alpha \neq 90^\circ$, on tire $t = x / (v_0 \cdot \cos \alpha)$ et on reporte :

$$z(x) = -g \cdot x^2 / (2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha) + \tan \alpha \cdot x + h$$



La trajectoire est une **parabole** de concavité tournée vers le bas. Si $\alpha = 90^\circ$, le mouvement est rectiligne vertical. Si $v_0 = 0$ (objet lâché), le mouvement est rectiligne vertical uniformément accéléré : $z = h - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$.

La flèche (altitude maximale). Au sommet S, la vitesse est horizontale : $v_z = 0$. Donc $t_S = v_0 \cdot \sin \alpha / g$ et : $z_S = h + v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha / (2g)$

Au sommet, la vitesse n'est pas nulle : elle vaut $v_0 \cdot \cos \alpha$.

La portée (cas $h = 0$, retour au niveau de départ). On cherche $x \neq 0$ tel que $z = 0$: $-g \cdot x / (2v_0^2 \cos^2 \alpha) + \tan \alpha = 0$, soit $x = 2v_0^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha / g$:

$$x_P = v_0^2 \cdot \sin(2\alpha) / g$$

À v_0 fixée, la portée est maximale quand $\sin(2\alpha) = 1$, soit $\alpha = 45^\circ$, et vaut v_0^2/g . Deux angles complémentaires (par exemple 30° et 60°) donnent la même portée, le plus grand avec une flèche plus haute. La durée de vol vaut alors $2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha / g$. Si $h \neq 0$, il faut résoudre l'équation du second degré $z(x) = 0$, et l'angle optimal est inférieur à 45° .

Chute libre : ce qu'il faut retenir

$\vec{a} = \vec{g}$, indépendante de m

v_x constante

$v_z = -g \cdot t + v_0 \cdot \sin \alpha$

trajectoire parabolique

flèche : $v_z = 0$

portée : $z = 0$

Repères complémentaires, sans séquence causale

Limite du modèle. Dans l'air, les frottements augmentent avec la vitesse ; le modèle de la chute libre convient pour des objets denses et lents (une bille d'acier, un poids d'athlétisme), beaucoup moins pour une balle de tennis de table ou une plume.

4. Particule chargée dans un champ électrique uniforme

Champ entre deux plaques. Entre deux plaques planes et parallèles, distantes de d et soumises à une tension $U = V_A - V_B > 0$, il règne (loin des bords) un **champ électrique uniforme** :

- perpendiculaire aux plaques ;
- orienté de la plaque positive (A) vers la plaque négative (B), c'est-à-dire dans le sens des potentiels décroissants ;
- de valeur $E = U/d$ (E en $V \cdot m^{-1}$, U en V, d en m).

Force électrique. Une particule de charge q placée dans ce champ subit la force $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ (en N, q en C). Si $q > 0$, $\vec{F}$ a le sens de $\vec{E}$; si $q < 0$ (électron, $q = -e$), $\vec{F}$ est de sens opposé à $\vec{E}$. Charge élémentaire : $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C.

Le poids est négligeable. Pour un électron ($m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg) dans un champ de $1,0 \times 10^4$ V·m⁻¹ : $F = e \cdot E = 1,6 \times 10^{-15}$ N, alors que $P = m \cdot g \approx 8,9 \times 10^{-30}$ N. Le rapport F/P vaut environ 2×10^{14} : on néglige le poids. C'est vrai aussi pour un proton ($m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg) et pour les ions dans les champs usuels.

Accélération. Deuxième loi, poids négligé, dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen :

$$\vec{a} = q \cdot \vec{E} / m$$

Le vecteur accélération est **constant** : la situation est mathématiquement identique à la chute libre, en remplaçant g par $q \cdot E/m$. Toutes les méthodes du paragraphe 3 s'appliquent.

Déviation d'un faisceau. Une particule de charge q entre en O entre les plaques avec une vitesse $\vec{v}_0$ horizontale, parallèle aux plaques ; le champ $\vec{E}$ est vertical. Axe (Ox) selon $\vec{v}_0$, axe (Oy) vertical, orienté dans le sens de la force. Avec $a = |q| \cdot E/m$:

$$v_x = v_0 ; v_y = a \cdot t ; x = v_0 \cdot t ; y = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Trajectoire : $y = |q| \cdot E \cdot x^2 / (2 \cdot m \cdot v_0^2)$, arc de parabole. À la sortie des plaques de longueur L (date $\tau = L/v_0$), la déviation vaut :

$$y_S = |q| \cdot E \cdot L^2 / (2 \cdot m \cdot v_0^2)$$

Après les plaques, la particule n'est plus soumise à aucune force notable : elle poursuit en ligne droite (principe d'inertie). Ce principe est utilisé pour dévier les faisceaux dans les anciens oscilloscopes, les spectromètres et les imprimantes à jet d'encre.

5. Accélérateur linéaire de particules

Si la vitesse initiale est parallèle au champ (ou nulle), le mouvement est **rectiligne uniformément accéléré**. C'est le principe d'un **accélérateur linéaire** (canon à électrons, première étape des accélérateurs de recherche, accélérateurs médicaux de radiothérapie).

Une particule de charge q , partant du repos d'une plaque, traverse l'espace de largeur d sous la tension U . Par la loi de Newton : $a = |q| \cdot U / (m \cdot d)$, puis $v^2 = 2 \cdot a \cdot d$, d'où :

$$v = \sqrt{2 \cdot |q| \cdot U / m}$$

La vitesse acquise ne dépend que de la tension, pas de la distance entre les plaques. Pour obtenir de grandes vitesses, on enchaîne plusieurs étages accélérateurs. Ce calcul reste valable tant que v reste petite devant la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹ (au-delà de 10 % de c environ, il faut la relativité, hors programme).

6. Aspects énergétiques

Théorème de l'énergie cinétique. Dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un système entre deux positions A et B est égale à la somme des travaux des forces appliquées :

$$\Delta E_c = E_c(B) - E_c(A) = \Sigma W(\vec{F}) \text{ entre A et B, avec } E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ (en J).}$$

Travail du poids : $W(\vec{P}) = m \cdot g \cdot (z_A - z_B)$, indépendant du chemin suivi (force conservative). **Travail de la force électrique** dans un champ uniforme : $W(\vec{F}) = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}$, lui aussi indépendant du chemin.

Application à l'accélérateur : $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - 0 = |q| \cdot U$, d'où $v = \sqrt{(2|q|U/m)}$: on retrouve en une ligne le résultat du paragraphe 5. Pour un électron, l'énergie acquise sous 1 V vaut $1,60 \times 10^{-19}$ J, c'est l'**électronvolt** (1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J).

Conservation de l'énergie mécanique en chute libre. Le poids étant la seule force, $E_m = E_c + E_{pp} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z$ est constante. Pour un projectile lancé à la hauteur h avec la vitesse v_0 , la vitesse à l'altitude z vaut :

$$v = \sqrt{(v_0^2 + 2g(h - z))}$$

Elle ne dépend pas de l'angle de tir. L'énergie donne vite une valeur de vitesse, mais pas la date ni la direction : pour la trajectoire, la loi de Newton reste indispensable.

Question posée	Outil le plus efficace
Position à une date donnée, trajectoire, portée	Deuxième loi de Newton et équations horaires
Valeur de la vitesse en un point connu	Bilan énergétique
Vitesse acquise dans un accélérateur	Théorème de l'énergie cinétique
Déviation d'un faisceau	Loi de Newton (mouvement parabolique)

Exemples résolus

Exemple 1 : tir d'un ballon

Un ballon est frappé depuis le sol avec une vitesse $v_0 = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ faisant un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'horizontale. On néglige les actions de l'air. $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. a) Établir les équations horaires. b) Calculer la flèche. c) Calculer la durée du vol et la portée.

Résolution. a) Système : le ballon, modélisé par son centre de masse. Référentiel terrestre supposé galiléen. Seule force : le poids. Deuxième loi : $m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g}$, donc $\vec{a} = \vec{g}$: $a_x = 0$; $a_z = -g$. Avec $v_{0x} = 12 \cdot \cos 30^\circ \approx 10,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_{0z} = 12 \cdot \sin 30^\circ = 6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, origine au point de frappe : $x(t) = 10,4 \cdot t$; $z(t) = -4,905 \cdot t^2 + 6,0 \cdot t$. b) Au sommet, $v_z = -9,81 \cdot t + 6,0 = 0$, d'où $t_S = 0,612 \text{ s}$. $z_S = v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha / (2g) = 144 \times 0,25 / 19,62 \approx 1,83 \text{ m}$. c) Le ballon retombe ($z = 0$, $t \neq 0$) à $t = 2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha / g = 12/9,81 \approx 1,22 \text{ s}$. Portée : $x_P = v_0^2 \cdot \sin(2\alpha) / g = 144 \times \sin 60^\circ / 9,81 = 144 \times 0,866/9,81 \approx 12,7 \text{ m}$. Vérification : $10,39 \times 1,223 \approx 12,7 \text{ m}$.

Exemple 2 : un canon à électrons

Dans un canon à électrons, des électrons émis sans vitesse par une cathode sont accélérés vers une anode sous une tension $U = 1,00 \text{ kV}$. Données : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. a) Préciser le sens du champ électrique entre la cathode et l'anode. b) Calculer la vitesse des électrons à l'anode. c) Le modèle non relativiste est-il acceptable ?

Résolution. a) L'électron ($q = -e < 0$) doit être attiré vers l'anode : la force $\vec{F} = -e \cdot \vec{E}$ est dirigée de la cathode vers l'anode, donc $\vec{E}$ est dirigé de l'anode vers la cathode. L'anode est la plaque positive. b) Théorème de l'énergie cinétique entre cathode et anode (poids négligé) : $\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 - 0 = e \cdot U$. Donc $v = \sqrt{(2eU/m_e)} = \sqrt{(2 \times 1,60 \times 10^{-19} \times 1,00 \times 10^3 / 9,11 \times 10^{-31})} = \sqrt{(3,51 \times 10^{14})} \approx 1,87 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. c) $v/c = 1,87 \times 10^7 / 3,00 \times 10^8 \approx 0,062$, soit 6 % : le modèle classique reste acceptable.

Exemple 3 : déviation d'un faisceau d'électrons

Des électrons entrent en O, à mi-distance de deux plaques horizontales de longueur $L = 5,0 \text{ cm}$, avec une vitesse horizontale $v_0 = 2,0 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Le champ entre les plaques est vertical, dirigé vers le bas, de valeur $E = 1,0 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. a) Montrer que le poids est négligeable et donner les caractéristiques de l'accélération. b) Établir l'équation de la trajectoire. c) Calculer la déviation à la sortie des plaques.

Résolution. a) $F = e \cdot E = 1,60 \times 10^{-19} \times 1,0 \times 10^4 = 1,6 \times 10^{-15} \text{ N}$; $P = m_e \cdot g = 9,11 \times 10^{-31} \times 9,81 \approx 8,9 \times 10^{-30} \text{ N}$. $F/P \approx 1,8 \times 10^{14}$: poids négligeable. Deuxième loi : $a \rightarrow = -e \cdot E \rightarrow / m_e$. $E \rightarrow$ vers le bas et charge négative : $a \rightarrow$ vertical vers le haut, de valeur $a = e \cdot E / m_e = 1,6 \times 10^{-15} / 9,11 \times 10^{-31} \approx 1,76 \times 10^{15} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. b) Axe (Ox) selon $v \rightarrow_0$, axe (Oy) vertical vers le haut. Intégration : $v_x = v_0$, $v_y = a \cdot t$; $x = v_0 \cdot t$, $y = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$. D'où $y = e \cdot E \cdot x^2 / (2 \cdot m_e \cdot v_0^2)$: arc de parabole tourné vers le haut. c) Durée de traversée : $\tau = L/v_0 = 0,050 / 2,0 \times 10^7 = 2,5 \times 10^{-9} \text{ s}$. $y_S = \frac{1}{2} \times 1,76 \times 10^{15} \times (2,5 \times 10^{-9})^2 = 0,5 \times 1,76 \times 10^{15} \times 6,25 \times 10^{-18} \approx 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}$, soit 5,5 mm vers le haut. Il faut donc que l'écart entre les plaques dépasse $2 \times 5,5 = 11 \text{ mm}$ pour que les électrons ne heurtent pas la plaque.

Méthodes et pièges

- Méthode type : écris dans l'ordre système, référentiel galiléen, bilan des forces, deuxième loi, projections, intégration, conditions initiales. Chaque étape vaut des points au bac.
- Fais un schéma avec les axes orientés, l'angle α et le vecteur $v \rightarrow_0$: la plupart des erreurs de signe viennent d'un axe mal orienté.
- Projette correctement $v \rightarrow_0$: $v_0 \cdot \cos \alpha$ sur l'horizontale, $v_0 \cdot \sin \alpha$ sur la verticale quand α est mesuré par rapport à l'horizontale.
- La masse disparaît en chute libre : ne la cherche pas dans les équations horaires, et n'écris pas qu'un objet lourd tombe plus vite (en l'absence d'air).
- Au sommet de la trajectoire, c'est v_z qui est nulle, pas la vitesse : la vitesse vaut $v_0 \cdot \cos \alpha$.
- La formule $x_P = v_0^2 \cdot \sin(2\alpha) / g$ ne vaut que si l'arrivée est à la même altitude que le départ. Sinon, résous $z(x) = 0$ et garde la racine positive.
- Pour une charge négative, la force électrique est opposée au champ. Le champ va de la plaque + vers la plaque -.
- Justifie toujours que le poids d'une particule chargée est négligeable par un calcul de rapport, ne l'affirme pas.
- Pour une valeur de vitesse, pense d'abord à l'énergie ; pour une position ou une date, utilise les équations horaires.

Vers le PASS

En PASS, la deuxième loi de Newton est l'outil de base de la biomécanique et de la biophysique : forces exercées sur une articulation, mouvement d'un segment du corps, sédimentation de particules dans un fluide (où l'on ajoute la poussée d'Archimède et une force de frottement proportionnelle à la vitesse, ce qui mène à une vitesse limite). Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique uniforme sert à comprendre l'électrophorèse, les spectromètres de masse et les accélérateurs utilisés en radiothérapie, avec l'électronvolt comme unité d'énergie privilégiée en imagerie et en physique des rayonnements. Les QCM testent beaucoup les cas limites : indépendance vis-à-vis de la masse, déviation inversement proportionnelle à l'énergie cinétique, rôle du signe de la charge.

Suite en PASS : Forces, mouvements et bilans énergétiques

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Un chariot de masse 2,0 kg, initialement immobile sur un rail horizontal, est tiré par une force horizontale constante de 5,0 N. Les frottements sont négligés. a) Calculer son accélération. b) Calculer sa vitesse au bout de 4,0 s et la distance parcourue.
2. Une cabine d'ascenseur de masse 800 kg démarre vers le haut avec une accélération de $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Calculer la tension du câble ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Comparer au poids de la cabine.
3. Une bille est lâchée sans vitesse initiale d'une hauteur de 20 m. On néglige les actions de l'air. Calculer la durée de la chute et la vitesse à l'arrivée au sol, de deux façons (équations horaires, puis énergie).
4. Un proton, initialement au repos, est accéléré sous une tension de 5,0 kV. Calculer l'énergie cinétique acquise (en J et en eV) et la vitesse finale. Données : $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
5. Deux plaques parallèles distantes de 2,0 cm sont soumises à une tension de 400 V. a) Calculer la valeur du champ électrique entre les plaques. b) Calculer la force électrique subie par un électron et la comparer à son poids ($m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$).

Niveau 2 : type bac

6. Une athlète lance un poids depuis une hauteur $h = 2,0 \text{ m}$ avec une vitesse $v_0 = 13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ faisant un angle $\alpha = 40^\circ$ avec l'horizontale. On néglige les actions de l'air. a) Établir les équations horaires du mouvement. b) En déduire l'équation de la trajectoire. c) Calculer la hauteur maximale atteinte. d) Calculer la longueur du jet, mesurée au sol depuis la verticale du point de lancement.
7. Un caillou est lancé horizontalement du haut d'une falaise de 45 m avec une vitesse de $8,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. On néglige les actions de l'air. a) Calculer la durée de la chute. b) À quelle distance du pied de la falaise touche-t-il l'eau ? c) Calculer la valeur de sa vitesse à l'impact, par deux méthodes. d) Quel angle sa vitesse fait-elle alors avec l'horizontale ?
8. Un électron entre avec une vitesse horizontale $v_0 = 3,0 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à mi-distance entre deux plaques horizontales de longueur $L = 4,0 \text{ cm}$, distantes de $d = 2,0 \text{ cm}$, soumises à une tension $U = 200 \text{ V}$. a) Calculer E et l'accélération de l'électron. b) Calculer la déviation verticale à la sortie des plaques. L'électron sort-il des plaques ? c) Calculer l'angle de déviation à la sortie.

9. Dans un canon à électrons, la cathode et l'anode sont distantes de 3,0 cm et la tension accélératrice vaut 1,5 kV. Les électrons partent sans vitesse. a) Calculer la vitesse à l'anode par le théorème de l'énergie cinétique. b) Calculer l'accélération par la deuxième loi de Newton, puis la durée du trajet. c) Vérifier la cohérence des deux méthodes en recalculant la distance parcourue.

Niveau 3 : vers le PASS

10. Un projectile est lancé depuis le sol avec une vitesse $v_0 = 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; il doit retomber au sol à 30 m du point de tir. a) Montrer que deux angles de tir conviennent et les calculer. b) Lequel donne la durée de vol la plus courte ? Calculer les deux durées.
11. Un électron et un proton pénètrent dans le même champ électrique uniforme, perpendiculairement à $E \rightarrow$, sur la même longueur L. a) Montrer que la déviation à la sortie s'écrit $y_S = |q| \cdot E \cdot L^2 / (4 \cdot E_c)$, où E_c est l'énergie cinétique d'entrée. b) Comparer leurs déviations s'ils entrent avec la même énergie cinétique. c) Comparer leurs déviations s'ils entrent avec la même vitesse ($m_p/m_e \approx 1,83 \times 10^3$). Préciser le sens de chaque déviation.
12. Une personne de 60 kg se tient sur un pèse-personne dans un ascenseur. Le pèse-personne affiche la valeur N/g, où N est la force qu'il exerce sur la personne ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Calculer l'affichage dans les cas suivants : a) ascenseur à vitesse constante ; b) ascenseur qui descend en ralentissant, accélération de valeur $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; c) ascenseur qui monte en ralentissant, accélération de valeur $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; d) câble rompu, chute libre.
13. Vrai ou faux ? Justifier. A) En chute libre, un objet plus lourd a une trajectoire plus courbée. B) En chute libre, la composante horizontale de la vitesse est constante. C) Au sommet de la trajectoire, la vitesse est nulle. D) La portée est maximale pour $\alpha = 45^\circ$ quelle que soit la hauteur de lancement. E) En chute libre, l'énergie mécanique se conserve.

Corrigés

1. Système : chariot ; référentiel terrestre galiléen. Forces : poids et réaction verticaux qui se compensent, force $F \rightarrow$ horizontale.
- a) Projection horizontale : $F = m \cdot a$, donc $a = F/m = 5,0/2,0 = 2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. b) MRUV partant du repos : $v = a \cdot t = 2,5 \times 4,0 = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = 0,5 \times 2,5 \times 16 = 20 \text{ m}$.
2. Axe vertical vers le haut. Forces : poids ($-m \cdot g$) et tension T. Deuxième loi : $T - m \cdot g = m \cdot a$, donc $T = m(g + a) = 800 \times (9,81 + 1,5) = 800 \times 11,31 \approx 9,0 \times 10^3 \text{ N}$ (9 048 N). Poids : $P = 800 \times 9,81 \approx 7,8 \times 10^3 \text{ N}$. La tension dépasse le poids : c'est cette différence qui produit l'accélération vers le haut.
3. Axe vertical vers le bas, origine au point de lâcher. $a = g$, $v_0 = 0$: $z = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$. Au sol, $z = 20 \text{ m}$: $t = \sqrt{(2 \times 20 / 9,81)} = \sqrt{4,08} \approx 2,0 \text{ s}$ (2,02 s). $v = g \cdot t = 9,81 \times 2,02 \approx 19,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Par l'énergie : $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$, donc $v = \sqrt{(2gh)} = \sqrt{(2 \times 9,81 \times 20)} = \sqrt{392} \approx 19,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les deux méthodes concordent.
4. Théorème de l'énergie cinétique : $E_c = e \cdot U = 1,60 \times 10^{-19} \times 5,0 \times 10^3 = 8,0 \times 10^{-16} \text{ J}$, soit $5,0 \times 10^3 \text{ eV}$ (5,0 keV). $v = \sqrt{(2E_c/m_p)} = \sqrt{(2 \times 8,0 \times 10^{-16} / 1,67 \times 10^{-27})} = \sqrt{(9,58 \times 10^{11})} \approx 9,8 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
5. a) $E = U/d = 400/0,020 = 2,0 \times 10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.
- b) $F = e \cdot E = 1,60 \times 10^{-19} \times 2,0 \times 10^4 = 3,2 \times 10^{-15} \text{ N}$. $P = 9,11 \times 10^{-31} \times 9,81 \approx 8,9 \times 10^{-30} \text{ N}$. $F/P \approx 3,6 \times 10^{14}$: le poids est totalement négligeable.

6. a) Système : le poids d'athlétisme ; référentiel terrestre galiléen ; seule force : son poids. $\vec{a} = \vec{g}$.

Origine au sol, à la verticale du point de lancement, axe (Oz) vers le haut. $v_{0x} = 13 \cdot \cos 40^\circ \approx 9,96 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_{0z} = 13 \cdot \sin 40^\circ \approx 8,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$v_x = 9,96$; $v_z = -9,81 \cdot t + 8,36$; $x = 9,96 \cdot t$; $z = -4,905 \cdot t^2 + 8,36 \cdot t + 2,0$ (unités SI). b) $z = -g \cdot x^2 / (2v_0^2 \cos^2 \alpha) + \tan \alpha \cdot x + h$. Avec $2v_0^2 \cos^2 40^\circ = 2 \times 169 \times 0,587 \approx 198,4$ et $\tan 40^\circ \approx 0,839$: $z = -0,0495 \cdot x^2 + 0,839 \cdot x + 2,0$. c) $z_{\max} = h + v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha / (2g) = 2,0 + 169 \times 0,413 / 19,62 \approx 2,0 + 3,56 \approx 5,6 \text{ m}$. d) On résout $0,0495 \cdot x^2 - 0,839 \cdot x - 2,0 = 0$. Discriminant : $0,839^2 + 4 \times 0,0495 \times 2,0 \approx 0,704 + 0,396 = 1,100$; racine $\approx 1,049$. Racine positive : $x = (0,839 + 1,049) / (2 \times 0,0495) \approx 1,888 / 0,0989 \approx 19 \text{ m}$ (19,1 m).

7. Origine au pied de la falaise, axe (Oz) vers le haut, départ en (0 ; 45 m), $\vec{v}_0$ horizontale.

a) $z = 45 - 4,905 \cdot t^2 = 0$ donne $t = \sqrt{(45/4,905)} = \sqrt{9,17} \approx 3,0 \text{ s}$ (3,03 s). b) $x = v_0 \cdot t = 8,0 \times 3,03 \approx 24 \text{ m}$. c) Méthode 1 : $v_x = 8,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_z = -9,81 \times 3,03 \approx -29,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $v = \sqrt{(8,0^2 + 29,7^2)} = \sqrt{(64 + 883)} \approx 30,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Méthode 2 (énergie mécanique conservée) : $v = \sqrt{(v_0^2 + 2gh)} = \sqrt{(64 + 2 \times 9,81 \times 45)} = \sqrt{946,9} \approx 30,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. d) $\tan \beta = |v_z|/v_x = 29,7/8,0 \approx 3,71$, donc $\beta \approx 75^\circ$ sous l'horizontale.

8. a) $E = U/d = 200/0,020 = 1,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. $a = e \cdot E/m_e = 1,60 \times 10^{-15} / 9,11 \times 10^{-31} \approx 1,76 \times 10^{15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (poids négligé, voir exercice 5).

b) $\tau = L/v_0 = 0,040/3,0 \times 10^7 \approx 1,33 \times 10^{-9} \text{ s}$. $y_s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \tau^2 = 0,5 \times 1,76 \times 10^{15} \times (1,33 \times 10^{-9})^2 \approx 1,6 \times 10^{-3} \text{ m}$ (1,6 mm). L'électron entre à 1,0 cm de chaque plaque et ne dévie que de 1,6 mm : **il sort des plaques**. c) À la sortie : $v_y = a \cdot \tau = 1,76 \times 10^{15} \times 1,33 \times 10^{-9} \approx 2,34 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. $\tan \theta = v_y/v_0 = 2,34 \times 10^6 / 3,0 \times 10^7 \approx 0,078$, donc $\theta \approx 4,5^\circ$.

9. a) $\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = e \cdot U$, $v = \sqrt{(2 \times 1,60 \times 10^{-19} \times 1,5 \times 10^3 / 9,11 \times 10^{-31})} = \sqrt{(5,27 \times 10^{14})} \approx 2,3 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b) $E = U/d = 1,5 \times 10^3 / 0,030 = 5,0 \times 10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$; $a = e \cdot E/m_e = 8,0 \times 10^{-15} / 9,11 \times 10^{-31} \approx 8,8 \times 10^{15} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Mouvement rectiligne uniformément accéléré partant du repos : $t = v/a = 2,30 \times 10^7 / 8,78 \times 10^{15} \approx 2,6 \times 10^{-9} \text{ s}$. c) $d = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = 0,5 \times 8,78 \times 10^{15} \times (2,62 \times 10^{-9})^2 \approx 0,5 \times 8,78 \times 10^{15} \times 6,85 \times 10^{-18} \approx 3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$: on retrouve bien 3,0 cm, les deux méthodes sont cohérentes.

10. a) Portée au même niveau : $x_P = v_0^2 \cdot \sin(2\alpha)/g$, donc $\sin(2\alpha) = x_P \cdot g/v_0^2 = 30 \times 9,81/400 \approx 0,736$. Comme $0,736 < 1$, il existe deux solutions dans $[0^\circ ; 180^\circ]$ pour 2α : $2\alpha \approx 47,4^\circ$ ou $2\alpha \approx 180^\circ - 47,4^\circ = 132,6^\circ$. Donc $\alpha_1 \approx 23,7^\circ$ et $\alpha_2 \approx 66,3^\circ$ (complémentaires).

b) Durée de vol $t = 2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha / g$. Pour $\alpha_1 : 2 \times 20 \times \sin 23,7^\circ / 9,81 \approx 40 \times 0,402 / 9,81 \approx 1,64$ s. Pour $\alpha_2 : 40 \times 0,916 / 9,81 \approx 3,73$ s. Le tir **tendu** ($23,7^\circ$) est le plus rapide.

11. a) Avec $a = |q| \cdot E / m$ et $\tau = L / v_0 : yS = \frac{1}{2} \cdot (|q| \cdot E / m) \cdot L^2 / v_0^2 = |q| \cdot E \cdot L^2 / (2 \cdot m \cdot v_0^2)$. Or $m \cdot v_0^2 = 2 \cdot Ec$, d'où $yS = |q| \cdot E \cdot L^2 / (4 \cdot Ec)$.

b) Même charge en valeur absolue (e), même E, même L, même Ec : **même valeur de déviation**, indépendante de la masse. c) À même vitesse, $yS = |q| \cdot E \cdot L^2 / (2 \cdot m \cdot v_0^2)$ est inversement proportionnelle à la masse : $yS(\text{électron}) / yS(\text{proton}) = m_p / m_e \approx 1,83 \times 10^3$. L'électron est dévié environ 1 800 fois plus. Sens : le proton ($q > 0$) est dévié dans le sens de $E \rightarrow$, l'électron ($q < 0$) en sens contraire.

12. Axe vertical vers le haut. Forces : poids $m \cdot g$ vers le bas, réaction N vers le haut. Deuxième loi : $N - m \cdot g = m \cdot a$, donc $N = m(g + a)$, a étant la composante verticale de l'accélération.

a) $a = 0 : N = 60 \times 9,81 = 589$ N ; affichage **60 kg**. b) Descente en ralentissant : la vitesse est vers le bas et diminue, donc $a \rightarrow$ est vers le haut, $a = +2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. $N = 60 \times 11,81 \approx 709$ N ; affichage $709 / 9,81 \approx 72$ kg. c) Montée en ralentissant : $a \rightarrow$ vers le bas, $a = -2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. $N = 60 \times 7,81 \approx 469$ N ; affichage ≈ 48 kg. d) Chute libre : $a = -g$, $N = 0$; affichage **0 kg** (impesanteur apparente).

13. A) **Faux** : $a \rightarrow = g \rightarrow$ quelle que soit la masse ; deux objets lancés de la même façon ont la même trajectoire.

B) **Vrai** : $a_x = 0$, donc $v_x = v_0 \cdot \cos \alpha$ constante. C) **Faux** : seule v_z est nulle ; $v = v_0 \cdot \cos \alpha$ (nulle seulement pour un tir vertical). D) **Faux** : 45° est l'optimum si départ et arrivée sont au même niveau ; depuis une hauteur $h > 0$, l'angle optimal est inférieur à 45° . E) **Vrai** : la seule force est le poids, force conservative ; $Em = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z$ reste constante.