

Mouvement dans un champ de **pesanteur** uniforme

Des lois de Newton à la trajectoire d'un ballon de basket, en passant par une balle de tennis et une particule chargée entre deux plaques : quatre situations, une seule méthode. Et une histoire vieille de presque quatre siècles.

AVANT-PROPOS — UN PEU D'HISTOIRE DES SCIENCES

Des plans inclinés de Galilée aux tubes cathodiques de Thomson

Pendant près de deux mille ans, la physique occidentale s'appuie sur les idées d'**Aristote** : un objet lourd tombe plus vite qu'un objet léger, et un projectile suit une trajectoire faite de lignes droites brisées. Ces idées, intuitives mais fausses, ne seront sérieusement remises en cause qu'au XVII^e siècle.

C'est **Galilée** qui change tout. Dans les années 1630, à Padoue puis à Florence, il étudie la chute des corps à l'aide de plans inclinés (pour « ralentir » la chute et pouvoir la chronométrer avec les moyens de l'époque) et démontre que tous les corps tombent avec la même accélération, indépendamment de leur masse — en l'absence de frottement. Dans son dernier ouvrage, *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638), il établit aussi que la trajectoire d'un projectile est une **parabole**, résultat de la composition d'un mouvement horizontal uniforme et d'une chute verticale uniformément accélérée — exactement la démarche que vous allez suivre dans ce chapitre.

Un demi-siècle plus tard, **Isaac Newton** franchit une étape décisive : dans ses *Principia Mathematica* (1687), il montre que la pomme qui tombe et la Lune qui orbite autour de la Terre obéissent à la **même loi** — celle de la gravitation universelle. Cette unification entre le mouvement « terrestre » et le mouvement « céleste » est l'une des plus grandes idées de l'histoire des sciences, et c'est elle qui fonde les trois lois que vous allez utiliser dans toute la suite du chapitre.

Deux siècles plus tard encore, en 1897, le physicien anglais **J. J. Thomson** réutilise très exactement cette même méthode — mais en remplaçant la pesanteur par un **champ électrique** — pour dévier un faisceau de rayons cathodiques entre deux plaques métalliques. En mesurant cette déviation, il découvre l'**électron**, la première particule subatomique jamais identifiée. La partie V de ce chapitre reproduit, dans ses grandes lignes, l'expérience qui a valu à Thomson le prix Nobel de physique en 1906.

Dans ce cours :

[I. Rappels](#)[II. Chute libre](#)[III. La partie de tennis](#)[IV. Le basket](#)[V. Champ électrique](#)[Synthèse](#)

PARTIE I

Rappels

1.1 Les lois de Newton

RÉFÉRENTIEL GALILÉEN

Un référentiel est dit **galiléen** (ou inertiel) si le principe d'inertie — la première loi de Newton — y est vérifié : tout système isolé ou pseudo-isolé y est immobile, ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Aucun référentiel n'est *parfaitement* galiléen, mais certains le sont de façon approchée, sur une échelle de temps limitée adaptée au mouvement étudié.

POINT À CORRIGER — L'ESSENTIEL À RETENIR

Ce qui distingue vraiment ces trois référentiels, ce n'est pas seulement leur **origine**, mais aussi l'orientation de leurs **axes** : seul le référentiel terrestre tourne avec la Terre. Les référentiels géocentrique et héliocentrique, eux, ont des axes fixes, dirigés vers des étoiles lointaines considérées comme immobiles — c'est cette absence de rotation qui les rend galiléens sur de plus longues durées.

Référentiel terrestre

Origine et axes liés à un point fixe de la Terre : il tourne donc avec elle. Galiléen pour des mouvements de courte durée (quelques minutes), à l'échelle humaine — un ballon, une voiture, une chute libre.

Référentiel géocentrique

Origine au centre de la Terre, mais axes dirigés vers trois étoiles lointaines fixes (il ne tourne pas avec la Terre). Galiléen pour l'étude des satellites terrestres (Lune, satellites artificiels).

Référentiel héliocentrique

Origine au centre du Soleil (ou centre de masse du système solaire), mêmes axes fixes que le référentiel géocentrique. Galiléen pour l'étude des planètes du système solaire.

Dans ce chapitre, on étudie des mouvements de courte durée à la surface de la Terre (chute d'un objet, trajectoire d'une balle ou d'un ballon) : le référentiel terrestre, supposé galiléen, est donc le bon choix pour toutes les applications qui suivent.

PREMIÈRE LOI DE NEWTON — PRINCIPE D'INERTIE

Un système soumis à des forces qui se compensent est soit **immobile**, soit animé d'un **mouvement rectiligne uniforme** (vecteur vitesse constant, en norme comme en direction). La réciproque est vraie.

$$\Sigma F_{\text{ext}} = 0 \iff v = \text{constante}$$

DEUXIÈME LOI DE NEWTON — PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE

La somme des forces auxquelles est soumis un système ponctuel est égale au produit de la masse m du système par le vecteur accélération.

$$\Sigma F_{\text{ext}} = m \times a$$

TROISIÈME LOI DE NEWTON — PRINCIPE DES ACTIONS RÉCIPROQUES

Si un système A exerce une force sur un système B, alors le système B exerce sur A une force de même valeur, même direction, mais de sens opposé.

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

1.2 Les différentes énergies

ÉNERGIE CINÉTIQUE E_c

L'énergie qu'un corps possède du fait de sa vitesse. Elle dépend de la masse de l'objet et de sa vitesse.

$$E_C = (1/2) \times m \times v^2$$

ÉNERGIE POTENTIELLE DE PESANTEUR E_{pp}

L'énergie d'un corps à une position donnée par rapport à la surface de la Terre, due à l'action gravitationnelle exercée par la Terre. Elle est d'autant plus grande que l'altitude du corps par rapport au sol est grande.

$$E_{pp} = m \times g \times h$$

ÉNERGIE MÉCANIQUE E_M

La somme de l'énergie cinétique E_C et de l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} d'un corps.

$$E_M = E_C + E_{pp}$$

1.3 Conservation de l'énergie

Au cours de la chute d'un objet :

- l'altitude de l'objet par rapport au sol **diminue**, donc son énergie de position E_{pp} diminue aussi ;
- la vitesse de l'objet **augmente**, donc son énergie cinétique E_C augmente aussi.

Il y a donc **transfert** de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique.

À RETENIR

Au cours d'une chute sans frottements, l'énergie mécanique est **constante** : on dit qu'elle se conserve.

1.4 Travail d'une force

DÉFINITION

Le travail d'une force représente l'énergie développée par cette force lors du déplacement de son point d'application.

$$W_{AB}(F) = F \cdot AB = F \times AB \times \cos(\alpha)$$

Travail moteur

Si $W > 0$, la force favorise le déplacement du système.

Travail résistant

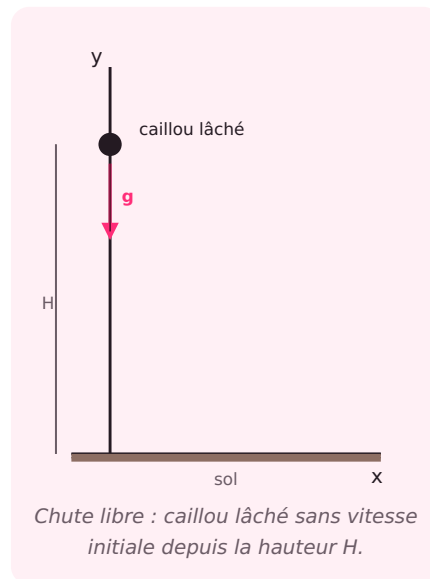
Si $W < 0$, la force gêne le déplacement du système.

FORCE CONSERVATIVE

Une force conservative est une force dont le travail ne dépend pas du chemin suivi par le corps qui la subit, mais seulement des points de départ et d'arrivée A et B. Le poids est l'exemple le plus courant d'une force conservative.

Application n°1 — Étude de la chute libre

On lâche un caillou depuis une hauteur H , sans vitesse initiale. Déterminons ses équations horaires.



2.1 Mise en équation

SITUATION

Référentiel : terrestre, supposé galiléen. · Système : caillou de masse m .

Bilan des forces : le poids P , de direction verticale, de sens vers le bas, de norme $P = mg$, appliqué au centre d'inertie (frottements et poussée d'Archimède négligés).

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\Sigma \mathbf{F} = m \times \mathbf{a} \Leftrightarrow \mathbf{P} = m \times \mathbf{a} \Leftrightarrow m \mathbf{g} = m \mathbf{a} \Leftrightarrow \mathbf{a} = \mathbf{g}$$

2.2 Résolution — accélération, vitesse, position

On choisit un axe (Oy) vertical, orienté vers le **haut**, d'origine au sol — la même convention que dans toutes les applications suivantes de ce chapitre. Le vecteur $\mathbf{g}$ est donc dirigé vers le bas, soit $a_y = -g$:

$$\mathbf{a} : a_x = 0 \cdot a_y = -g$$

HARMONISATION DES NOTATIONS

Pour rester cohérent avec les applications n°2 et n°3 de ce chapitre (qui utilisent toutes deux un axe (Oy) orienté vers le haut, avec $a_y = -g$), ce même choix d'axe est repris ici. Cela permet d'utiliser une seule et même convention de signe dans tout le chapitre — un axe (Oy) vers le bas fonctionnerait tout aussi bien, à condition de garder le même choix partout.

Or $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$, donc par primitive, avec les constantes d'intégration déterminées par les conditions initiales ($v_{0x} = v_{0y} = 0$, caillou lâché sans vitesse initiale) :

$$\mathbf{v} : v_x = 0 \cdot v_y = -g t$$

Or $\mathbf{v} = d\mathbf{OM}/dt$, donc par primitive, avec les conditions initiales $x(0) = 0$ et $y(0) = H$:

2.3 Équations horaires

$$x(t) = 0$$

$$y(t) = - (1/2) g t^2 + H$$

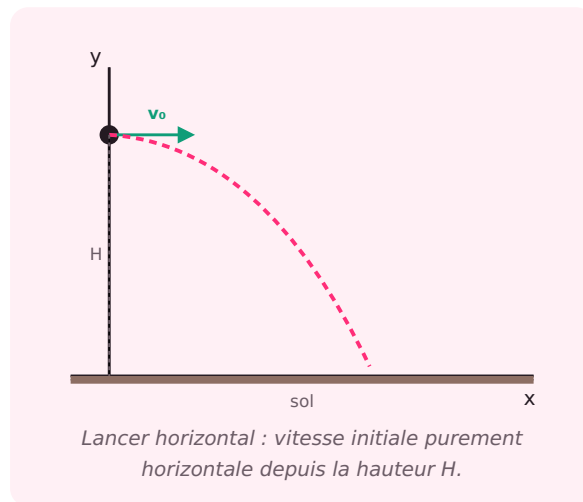
INTERPRÉTATION

Le mouvement est purement vertical ($x(t) = 0$ en permanence) et uniformément accéléré vers le bas : c'est la trajectoire attendue pour une chute libre sans vitesse initiale.

PARTIE III

Application n°2 — La partie de tennis

Une balle de tennis est frappée horizontalement avec une vitesse initiale v_0 , depuis une hauteur H .



3.1 Mise en équation

SITUATION

Référentiel : terrestre, supposé galiléen. · Système : balle de tennis de masse m .

Bilan des forces : le poids P (frottement de l'air et poussée d'Archimède supposés négligeables).

D'après la deuxième loi de Newton, comme en partie II : $a = g$, avec $a_x = 0$ et $a_y = -g$.

La vitesse initiale v_0 est purement horizontale, donc $v_x(0) = v_0$ et $v_y(0) = 0$:

$$v : v_x = v_0 \quad \cdot \quad v_y = -g t$$

3.2 Équations horaires

Avec les conditions initiales $x(0) = 0$ et $y(0) = H$:

$$x(t) = v_0 \times t$$

$$y(t) = - (1/2) g t^2 + H$$

3.3 Équation de la trajectoire $y(x)$

On isole t dans $x(t)$: $t = x / v_0$, puis on remplace dans $y(t)$:

$$y(x) = - (1/2) g (x / v_0)^2 + H$$

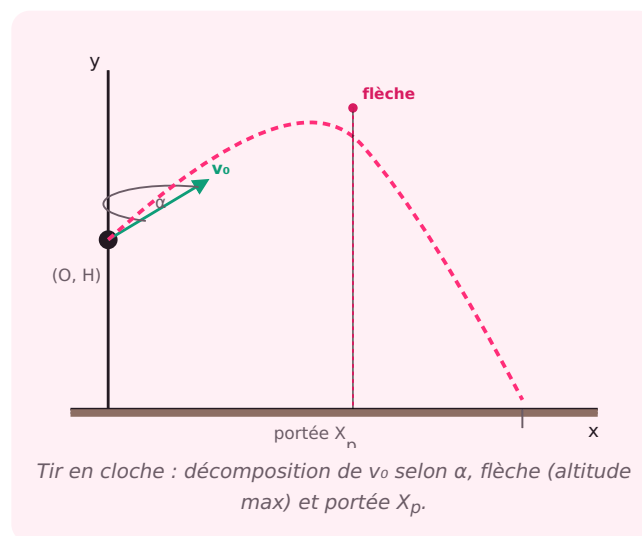
À RETENIR

C'est l'équation d'une **parabole** — exactement le résultat que Galilée établissait déjà en 1638, sans les outils du calcul différentiel que vous venez d'utiliser ici.

PARTIE IV

Application n°3 — Le basket

On lance un ballon de basket depuis le point $(0, H)$ avec une vitesse v_0 et un angle α par rapport à l'horizontale.



4.1 Mise en équation et composantes de v_0

D'après la deuxième loi de Newton, comme précédemment : $a_x = 0$, $a_y = -g$.

La vitesse initiale v_0 fait un angle α avec l'horizontale : on projette sur les deux axes.

$$v_{0x} = v_0 \cos(\alpha) \quad \cdot \quad v_{0y} = v_0 \sin(\alpha)$$

$$v_x = v_0 \cos(\alpha) \quad \cdot \quad v_y = -g t + v_0 \sin(\alpha)$$

4.2 Équations horaires et trajectoire

Avec les conditions initiales $x(0) = 0$ et $y(0) = H$:

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

$$y(t) = - (1/2) g t^2 + (v_0 \sin \alpha) t + H$$

En isolant $t = x / (v_0 \cos \alpha)$ et en substituant dans $y(t)$:

$$y(x) = -g x^2 / (2 v_0^2 \cos^2 \alpha) + x \tan(\alpha) + H$$

4.3 La flèche (altitude maximale)

Au sommet de la trajectoire, la vitesse verticale s'annule : $v_y(t_s) = 0$.

$$-g t_s + v_0 \sin(\alpha) = 0 \Leftrightarrow t_s = (v_0 \sin \alpha) / g$$

En substituant t_s dans $y(t)$:

$$y(t_s) = v_0^2 \sin^2(\alpha) / (2g) + H$$

CAS PARTICULIER — LE GOLF

Pour un tir au golf, la balle part du sol : $H = 0$. La flèche se réduit alors simplement à $v_0^2 \sin^2(\alpha) / (2g)$.

4.4 La portée (distance maximale)

La portée X_p est la position où le projectile retombe au sol, soit $y(X_p) = 0$:

$$-(g / (2 v_0^2 \cos^2 \alpha)) X_p^2 + (\tan \alpha) X_p + H = 0$$

Cette équation est de la forme $a X^2 + b X + c = 0$, avec $a = -g/(2v_0^2 \cos^2 \alpha)$, $b = \tan(\alpha)$ et $c = H$. On calcule le discriminant $\Delta = b^2 - 4ac$, puis les racines :

$$X_p = (-b \pm \sqrt{\Delta}) / (2a)$$

Seule la racine positive a un sens physique.

CAS PARTICULIER — TIR ET RÉCEPTION À LA MÊME HAUTEUR ($H = 0$)

Lorsque le projectile part du sol et y retombe ($H = 0$), l'équation se simplifie : $X_p [-(g/(2v_0^2 \cos^2 \alpha)) X_p + \tan(\alpha)] = 0$. La solution non nulle est :

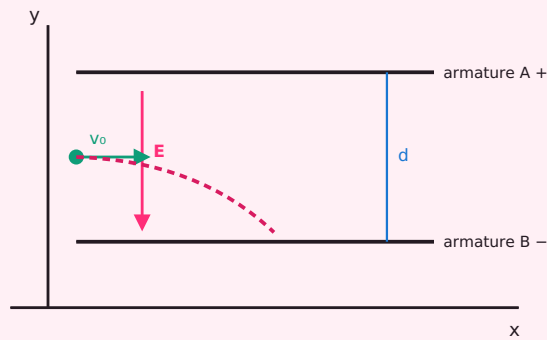
$$X_p = (2 v_0^2 \sin(\alpha) \cos(\alpha)) / g = v_0^2 \sin(2\alpha) / g$$

(en utilisant l'identité trigonométrique $\sin(2\alpha) = 2 \sin(\alpha) \cos(\alpha)$). C'est la formule classique de la **portée** d'un projectile, maximale pour $\alpha = 45^\circ$.

PARTIE V

Mouvement d'une particule dans un champ électrique

Une particule chargée pénètre, avec une vitesse horizontale v_0 , entre deux armatures planes parallèles A et B, séparées d'une distance d et soumises à une tension U .



Déviation d'une particule chargée entre deux armatures planes : le champ électrique E remplace ici le champ de pesanteur.

5.1 Le champ électrique uniforme entre deux armatures

Une tension U appliquée entre les deux armatures crée un champ électrique uniforme E :

$$E = U / d$$

avec E en $V \cdot m^{-1}$, U en V , et d en m . Le champ E est dirigé vers les potentiels décroissants (de l'armature + vers l'armature -). La force électrique exercée sur une particule de charge q placée dans ce champ est, en newtons :

$$F_E = q_{\text{particule}} \times E$$

5.2 Mise en équation — l'analogie avec la chute des corps

D'après la deuxième loi de Newton :

$$\Sigma F_{\text{ext}} = m a \iff F_E = m a \iff q E = m a \iff a = q E / m$$

Avec le champ E orienté selon (Oy) vers le bas (de l'armature $A+$ vers l'armature $B-$), soit $E = (0, -E)$:

$$a : a_x = 0 \quad \cdot \quad a_y = q(-E) / m$$

LE MÊME CALCUL QUE DANS LES PARTIES II À IV

On retrouve exactement la même structure mathématique que pour la chute libre ou le lancer d'un projectile : une accélération constante, purement verticale, qui remplace ici g par qE/m . C'est cette analogie que Thomson a exploitée pour dévier ses rayons cathodiques et découvrir l'électron.

5.3 Équations horaires

La vitesse initiale v_0 est purement horizontale, donc $v_x(0) = v_0$ et $v_y(0) = 0$:

$$v : v_x = v_0 \quad \cdot \quad v_y = (q(-E)/m) \times t$$

Avec les conditions initiales $x(0) = 0$ et $y(0) = 0$ (la particule entre à l'origine du repère) :

$$x(t) = v_0 \times t$$

$$y(t) = (q(-E) / m) \times (t^2 / 2)$$

5.4 Les particules chargées usuelles

Électron

$q = -e$ (charge négative) :
dévié vers l'armature positive.

Proton

$q = +e$ (charge positive
élémentaire).

Ion xénon Xe^{2+}

$q = +2e$ (deux charges
élémentaires positives).

Synthèse — le fil rouge du chapitre

De Galilée à Thomson, en passant par Newton, une seule et même méthode se répète : identifier la force, appliquer la deuxième loi de Newton pour obtenir une accélération constante, puis intégrer deux fois pour remonter à la vitesse, puis à la position.

Chute libre (II)

$a = g$ constant, trajectoire
rectiligne verticale.

Tennis (III)

Vitesse initiale horizontale :
trajectoire parabolique.

Basket (IV)

Vitesse initiale inclinée d'un
angle α : flèche et portée.

Champ électrique (V)

La force électrique qE remplace
le poids mg : même
mathématiques, autre échelle.

C'est précisément cette universalité — la même équation qui décrit un ballon de basket et un électron — que Newton avait pressentie en unifiant la pomme et la Lune, et que Thomson a exploitée deux siècles plus tard pour découvrir la première particule subatomique de l'histoire.