

Exercices

Corrigé de l'exercice 1 — Le skieur tracté

1. Poids $\vec{P}$ (résistant en montée), traction $\vec{T}$ (motrice), frottements $\vec{f}$ (résistants), réaction normale $\vec{R}_N$ (travail nul).
2. $\Delta z = L \sin \alpha = 300 \times \sin 22^\circ = 112 \text{ m}$; $W(\vec{P}) = -mg\Delta z = -85,0 \times 9,81 \times 112,4 = -9,37 \times 10^4 \text{ J}$; $W(\vec{T}) = T L \cos 30^\circ = 430 \times 300 \times \cos 30^\circ = +1,12 \times 10^5 \text{ J}$.
3. v constante $\Rightarrow \Delta E_c = 0$, donc (TEC) $W(\vec{f}) = -W(\vec{P}) - W(\vec{T}) = -1,80 \times 10^4 \text{ J}$, d'où $f = 1,80 \times 10^4 / 300 = 60 \text{ N}$.
4. Sans frottements, conservation de E_m : $v = \sqrt{2g\Delta z} = \sqrt{2 \times 9,81 \times 112,4} = 47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — **169 km/h**, valeur très supérieure aux vitesses effectivement observées sur une piste. Le modèle sans frottements est donc inadapté ici.
5. Avec $v = 60 \text{ km/h} = 16,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $\Delta E_m = \frac{1}{2}mv^2 - mg\Delta z = 1,18 \times 10^4 - 9,37 \times 10^4 = -8,19 \times 10^4 \text{ J} = W(\vec{f})$, d'où $f = 273 \text{ N}$ — **plus de quatre fois** le frottement de la montée à 8 km/h. La différence provient principalement de **l'air**, dont la traînée croît avec la vitesse (ch. 14, §7) — environ 213 N des 273 mesurés. Le bilan est cohérent avec la dépendance en vitesse étudiée au chapitre 14.

Corrigé de l'exercice 2 — Le canon à électrons

1. $E_c = eU = 1,60 \times 10^{-19} \times 10^3 = 1,6 \times 10^{-16} \text{ J} = 1,0 \text{ keV}$.
2. $v = \sqrt{2eU/m} = 1,9 \times 10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit 6 % de c : sous le seuil des 10 %, Newton reste légitime (de justesse).
3. Aucun champ, poids négligeable : électron pseudo-isolé — **mouvement rectiligne uniforme** (principe d'inertie, ch. 13), jusqu'à l'échantillon.

Corrigé de l'exercice 3 — Même tension, effets opposés (réflexion)

1. Pour le proton, $q = +e$: la force a le sens de $\vec{E}$, comme le déplacement. Le calcul signé donne

$$W_{AB} = e \frac{U}{d} (d - 0) = +eU = +250 \text{ eV}.$$

Le travail est donc moteur.

2. Pour l'électron, $q = -e$, avec le même déplacement :

$$W_{AB} = -e \frac{U}{d} (d - 0) = -eU = -250 \text{ eV}.$$

Le travail est résistant et $E_{c,f} = E_{c,i} + W = 400 - 250 = 150 \text{ eV}$.

3. Pour le trajet inverse, $x_B - x_A = 0 - d = -d$:

$$W_{AB} = -e \frac{U}{d}(0 - d) = +eU = +250 \text{ eV}.$$

L'électron gagne donc 250 eV et $E_{c,f} = 150 + 250 = 400 \text{ eV}$.

Corrigé — Problème de Fermi — La chute équivalente

Le bilan donne $mgh = \frac{1}{2}mv^2$; la masse disparaît, et

$$h = \frac{v^2}{2g} \sim \frac{(50/3,6)^2}{2 \times 10} = \frac{14^2}{20} \simeq 10 \text{ m}.$$

Un étage mesure environ 3 m : l'ordre de grandeur obtenu correspond donc à une chute depuis le **troisième étage**. Cette comparaison rend concrète l'énergie cinétique d'un véhicule à 50 km/h.

E.C.E.

1. Les neuf pointages répétés donnent l'incertitude-type de la moyenne : $u(z) = \sigma_z/\sqrt{N} = 3,0/\sqrt{9} = 1,0 \text{ mm}$.
2. Sur le premier intervalle, $v_x = (0,200 - 0)/0,040 = 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $v_z = (2,032 - 1,800)/0,040 = 5,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Puis

$$u(v_x) = u(v_z) = \frac{\sqrt{2} \times 1,0 \times 10^{-3}}{0,040} = 3,5 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}.$$

3. L'altitude du milieu vaut $z_{\text{mil}} = 1,916 \text{ m}$. Ainsi,

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_z^2) + mgz_{\text{mil}} \\ &= \frac{1}{2} \times 0,62 \times (5,0^2 + 5,8^2) + 0,62 \times 9,81 \times 1,916 \\ &= 29,83 \text{ J}. \end{aligned}$$

Les formules fournies donnent $u(E_c) = 0,168 \text{ J}$, $u(E_{pp}) = 0,004 \text{ J}$, puis $u(E_m) = 0,17 \text{ J}$. Le résultat s'écrit $E_m = (29,83 \pm 0,17) \text{ J}$.

4. L'écart maximal à la moyenne, 0,07 J, est inférieur à $u(E_m) = 0,17 \text{ J}$. Les fluctuations observées sont compatibles avec les incertitudes de pointage : aucune variation significative de l'énergie mécanique n'est mise en évidence.

Programmation Python

1. `Ec.append(0.5 * m * (vx**2 + vz**2))` et `Epp.append(m * g * zmil)`.

2. Moyenne $E_m = 29,85$ J, écart maximal 0,23 % — des fluctuations de mesure, **sans aucune tendance** : l'énergie mécanique du ballon est constante, aux incertitudes de pointage près.
3. E_c décroît puis recroît, E_{pp} fait l'inverse — elles **s'échangent** ; au sommet, E_c passe par son minimum (sans s'annuler : v_x demeure) et E_{pp} par son maximum. Leur somme reste sur la droite moyenne.
4. Avec $z[i]$, chaque vitesse (qui vaut **au milieu** de l'intervalle) est appariée à une altitude **en retard d'un demi-pas** : le biais systématique ($g\Delta t/2$ sur v_z) s'accumule en une **dérive** de +3,9 % — un artefact de méthode, pas une variation physique. Il faut donc vérifier l'appariement temporel des données avant de conclure.

Pour aller plus loin

Le modèle newtonien donnerait $\frac{1}{2}m_e c^2 = eU$, soit $U = m_e c^2 / (2e) \simeq 2,6 \times 10^5$ V. Ce résultat est impossible : une particule massive ne peut pas atteindre la vitesse c . La relation newtonienne a simplement été extrapolée très au-delà de son domaine de validité ; un modèle relativiste est alors nécessaire.