13 Utiliser les transferts d'énergie pour calculer une vitesse

1. $\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_c(A) + \mathscr{E}_{pp}(A)$

En choisissant le point A d'altitude $z_A = 1{,}50$ m comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathscr{E}_{pp}(A) = 0 \quad \text{et} \quad \mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_c(A) = \frac{1}{2}\cdot \mathrm{m}\cdot v_0^2$$

2. En B, $\mathscr{E}_c(B) = 0$.

$\mathscr{E}_m(B) = \mathscr{E}_c(B) + \mathscr{E}_{pp}(B)$

$\mathscr{E}_m(B) = \mathscr{E}_{pp}(B) = m\cdot g\cdot(z_B - z_A)$

3. a. L'énergie mécanique se conserve :

$$\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_m(B)$$

$$\frac{1}{2}\cdot m\cdot v_0^2 = m\cdot g\cdot(z_B - z_A)$$

$$v_0 = \sqrt{2\cdot g\cdot(z_B - z_A)} = \sqrt{2\cdot g\cdot h}, \qquad \text{avec } h = z_B - z_A$$

b. $v_0 = \sqrt{2\times 9{,}81\times(5{,}0 - 1{,}50)} = 8{,}3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$

15 Utiliser les transferts d'énergie pour calculer la valeur d'une force

1. $\Delta\mathscr{E}_m = \Delta\mathscr{E}_c + \Delta\mathscr{E}_{pp}$

Le mouvement ayant lieu sur une route horizontale, $\Delta\mathscr{E}_{pp} = 0$.

Lorsque le véhicule s'arrête, sa vitesse devient nulle ; la variation d'énergie mécanique s'écrit :

$$\Delta\mathscr{E}_m = \Delta\mathscr{E}_c = 0 - \frac{1}{2}\cdot m\cdot v^2 = -\frac{1}{2}\cdot m\cdot v^2$$

2. La force de freinage $\vec{f}$ est une force non conservative :

$\Delta\mathscr{E}_m = W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f}\cdot\overrightarrow{AB} = -\frac{1}{2}\cdot m\cdot v^2$

$-f\cdot AB = -\frac{1}{2}\cdot m\cdot v^2$

$f = \dfrac{m\cdot v^2}{2\,AB}$

$$f = \frac{1\,000\times\left(\dfrac{83{,}5}{3{,}6}\right)^2}{2\times 50{,}0} = 5{,}38\times 10^3\ \mathrm{N}$$

21 Le toboggan aquatique

1. L'expression de l'énergie potentielle de pesanteur est $\mathcal{E}_{pp}(D) = m \cdot g \cdot h$.

2. L'expression de l'énergie mécanique est :

$\mathcal{E}_m(D) = \mathcal{E}_c(D) + \mathcal{E}_{pp}(D)$, avec $\mathcal{E}_c(D) = 0$ J, puisque l'enfant part de D sans vitesse initiale.

On a donc $\mathcal{E}_m(D) = m \cdot g \cdot h$.

3. $\mathcal{E}_m(O) = \mathcal{E}_c(O) + \mathcal{E}_{pp}(O)$, avec $\mathcal{E}_p(O) = 0$ J, car le point O est choisi comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur.

$$\mathcal{E}_m(O) = \mathcal{E}_c(O) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

4. a. L'enfant est soumis à son poids et à la réaction normale du support (les frottements sont négligés). Parmi ces deux forces, seul le poids qui est une force conservative travaille, donc l'énergie mécanique se conserve : $\mathcal{E}_m(D) = \mathcal{E}_m(O)$,

soit : $$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

b. $v_0 = \sqrt{2 \times 10 \times 5{,}0} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

5. a. La vitesse est plus faible que celle trouvée ; cela signifie que les frottements ne sont pas négligeables. La force de frottements est une force non conservative qui travaille ; l'énergie mécanique ne se conserve donc pas.

b. $\mathcal{E}_m(O) - \mathcal{E}_m(D) = W_{DO}(\vec{f})$

$$W_{DO}(\vec{f}) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0'^2 - m \cdot g \cdot h$$

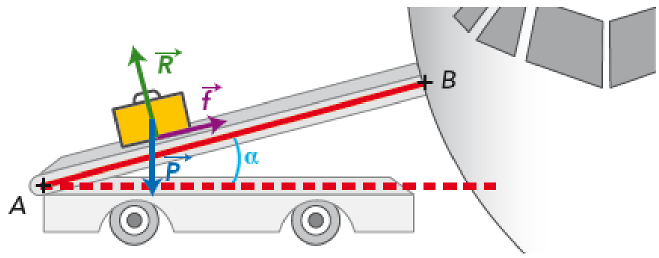
$$W_{DO}(\vec{f}) = \frac{1}{2} \times 35 \times 6{,}0^2 - 35 \times 10 \times 5{,}0$$

$$W_{DO}(\vec{f}) = 35 \times \left(\frac{36}{2} - 50\right) = -35 \times 32 = -1{,}1 \times 10^3 \text{ J}$$

Le signe moins montre que le travail est résistant.

22 Le chargement des bagages

1. La valise est soumise à son poids, $\vec{P}$, à la réaction normale du tapis, $\vec{R}$, et à la force motrice du tapis, $\vec{f}$.



2. La valise est soumise à deux forces qui travaillent : le poids, qui est une force conservative, et la force motrice $\vec{f}$, qui est une force non conservative. Son énergie mécanique ne se conserve donc pas au cours du mouvement.

3. L'énergie mécanique ne se conserve pas ; sa variation au cours du mouvement de la valise est égale au travail de la force non conservative :

$$\Delta\mathscr{E}_m = W(\vec{f})$$

La force $\vec{f}$ a une direction parallèle au déplacement et de même sens ; son travail est donc moteur : la variation d'énergie mécanique est positive.

4. a. Au cours du déplacement $\overrightarrow{AB}$:

$$\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_m(B) - \mathscr{E}_m(A) = \Delta\mathscr{E}_c - \Delta\mathscr{E}_{pp}$$

Puisque la valise se déplace à vitesse constante, $\Delta\mathscr{E}_c = 0$ J.

Si on choisit le point A d'altitude z_A comme référence de l'énergie potentielle de pesanteur :

$\mathscr{E}_{pp}(A) = 0$ J et $\mathscr{E}_{pp}(B) = m \cdot g \cdot z_B = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin\alpha$.

On a donc $\Delta\mathscr{E}_m = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin\alpha$.

On en déduit que $W_{AB}(\vec{f}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin\alpha$.

b. $W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} = f \cdot \ell = m \cdot g \cdot \ell \cdot \sin\alpha$,

soit : $f = m \cdot g \cdot \sin\alpha$

$f = 20 \times 10 \times \sin 15 = 2{,}0 \times 10^2 \times 0{,}26$

$f = 5{,}2 \times 10^1$ N.

23 Accélération d'une particule α

1. Le noyau d'hélium porte deux charges positives, soit : $q_\alpha = 2e$

2. Le travail de la force électrostatique est donnée par : $W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{AB}$, avec $\vec{F} = q_\alpha \cdot \vec{E}$,

donc : $W_{AB}(\vec{F}) = q_\alpha \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{AB}$.

Comme $\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = E \cdot AB \cdot \cos\alpha = E \cdot AB$ et $E = \dfrac{U_{AB}}{AB}$:

$$\vec{E} \cdot \overrightarrow{AB} = \frac{U_{AB}}{AB} \cdot AB = U_{AB} = V_A - V_B$$

donc $W_{AB}(\vec{F}) = q_\alpha \cdot (V_A - V_B)$.

3. La force électrostatique est une force conservative $\Delta\mathscr{E}_{pé} = \mathscr{E}_{pé}(B) - \mathscr{E}_{pé}(A) = -W_{AB}(\vec{F})$,

d'où : $\Delta\mathscr{E}_{pé} = q_\alpha \cdot (V_B - V_A)$

4. On étudie le système {particule} dans le référentiel terrestre.

La seule force qui s'applique au système est la force électrostatique $\vec{F}$.

Cette force est conservative, donc l'énergie mécanique se conserve entre A et B.

5. a. $\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_m(B) - \mathscr{E}_m(A) = 0$

$\Delta\mathscr{E}_m = \mathscr{E}_c(B) + \mathscr{E}_{pé}(B) - \mathscr{E}_c(A) - \mathscr{E}_{pé}(A) = \Delta\mathscr{E}_c + \Delta\mathscr{E}_{pé}$

$\Delta\mathscr{E}_m = 0$, donc $\Delta\mathscr{E}_{pé} = -\Delta\mathscr{E}_c$

En A, la vitesse est négligeable devant celle en B :

$$\Delta\mathscr{E}_c = \frac{1}{2} \cdot m_\alpha \cdot v_B^2$$

Par suite : $q_\alpha \cdot (V_B - V_A) = -\dfrac{1}{2} \cdot m_\alpha \cdot v_B^2$

$$V_A - V_B = \frac{m_\alpha \cdot v_B^2}{2 \cdot q_\alpha}$$

b. $V_A - V_B = \dfrac{6{,}70 \times 10^{-27} \times (1{,}00 \times 10^6)^2}{2 \times 2 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}$

$V_A - V_B = 1{,}05 \times 10^4$ V

24 Service au tennis

1. a. La balle est soumise uniquement à son poids.

b. Le poids est une force conservative.

2. $\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_c(A) + \mathscr{E}_{pp}(A)$

On choisit le point O comme référence pour l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathscr{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot y_A = m \cdot g \cdot H$$

et : $\mathscr{E}_c(A) = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$

donc : $\mathscr{E}_m(A) = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot H$.

Au point B, $y_B = 0$:

$$\mathscr{E}_m(B) = \mathscr{E}_c(B) + \mathscr{E}_{pp}(B) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$$

3. La balle est soumise à son poids qui est une force conservative ; son énergie mécanique se conserve :

$$\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_m(B)$$

4. a. $\dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot H = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$

Il vient $v_B = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot g \cdot h}$

b. $v_B = \sqrt{\left(\dfrac{126 \times 10^3}{3\,600}\right)^2 + 2 \times 9{,}81 \times 2{,}20}$

$v_B = 35{,}6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 128 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

c. La vitesse est beaucoup plus faible, les frottements ne sont donc pas négligés.

25 Hydoelectric dam

Traduction du texte et des questions :

« Dans un barrage hydroélectrique, l'énergie potentielle de pesanteur est convertie lorsque l'eau tombe. On considère la chute de mille mètres cubes d'eau sur 500 pieds.

1. En quelles énergies est convertie l'énergie potentielle de pesanteur ? Quel est l'intérêt de ces conversions ?

2. On considère que 90 % de l'énergie est convertie. Quelle énergie récupère-t-on lors de cette chute ?

3. Pourquoi le rendement n'est-il pas de 100 % ? En quelle énergie est convertie l'énergie perdue ? »

1. L'énergie potentielle de pesanteur est convertie en énergie cinétique, puis en énergie électrique.

Cela permet de produire de l'énergie électrique en fonction de la demande.

2. $\Delta\mathscr{E}_{pp} = m \cdot g \cdot h$

$\Delta\mathscr{E}_{pp} = 1000 \times 1000 \times 9{,}81 \times 500 \times 0{,}3048$

$\Delta\mathscr{E}_{pp} = 1{,}49 \times 10^9$ J

Énergie électrique produite :

$\mathscr{E}_{él} = 0{,}9 \times \Delta\mathscr{E}_p = 0{,}9 \times 1{,}49 \times 10^9$

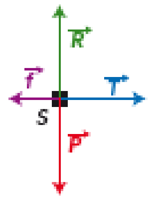
$\mathscr{E}_{él} = 1{,}34 \times 10^9$ J

3. Une partie de l'énergie potentielle de pesanteur est dissipée à cause des forces de frottements. L'énergie perdue est dissipée sous forme de chaleur.

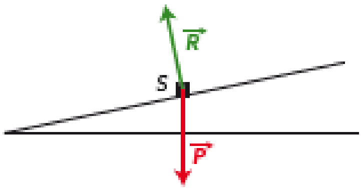
Pour aller plus loin

26 Épreuve du saut nautique

1. Au cours du trajet AB, la skieuse S est soumise à son poids, $\vec{P}$, à la réaction normale de la surface de l'eau, $\vec{R}$, à la force de traction, $\vec{T}$, et la force de frottements, $\vec{f}$.



Au cours du trajet BC, la skieuse S est soumise à son poids et à la réaction du tremplin dont la direction est perpendiculaire au déplacement.



2. ▸ Au cours du trajet AB, le poids et la réaction sont des forces dont la direction est perpendiculaire au déplacement; elles ne travaillent pas.

$W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \vec{AB} = -f \cdot AB$

$W_{AB}(\vec{T}) = \vec{T} \cdot \vec{AB} = T \cdot AB$

▸ Au cours du trajet BC, seul le poids travaille :

$W_{BC}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \vec{BC} = m \cdot g \cdot (z_B - z_C)$

$W_{BC}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha$ (l'axe (Oz) est vertical ascendant et le point d'altitude $z = 0$ est situé au niveau de la surface de l'eau).

3. La force de traction est non conservative; cela signifie que le travail de cette force dépend du chemin suivi.

4. a. La skieuse étant soumis à des forces non conservatives, entre A et B, l'énergie mécanique ne se conserve pas :

$$\mathscr{E}_m(B) - \mathscr{E}_m(A) = W_{AB}(\vec{f}) + W_{AB}(\vec{T})$$

b. En choisissant, la surface de l'eau comme référence pour l'énergie potentielle de pesanteur :

$$\mathscr{E}_{pp}(A) = \mathscr{E}_{pp}(B) = 0 \text{ J}$$

La relation de la question 4a permet d'écrire :

$\mathscr{E}_c(B) - \mathscr{E}_c(A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = -f \cdot AB + T \cdot AB$ (en A, la vitesse est nulle)

$$T = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + f \cdot AB\right) \cdot \frac{1}{AB}$$

$$T = \left(\frac{1}{2} \times 60{,}0 \times \left(\frac{57{,}0 \times 10^3}{3600}\right)^2 + 150 \times 200\right) \times \frac{1}{200}$$

$T = 188$ N

5. a. Le long du trajet BC, la skieuse est soumise uniquement à une force conservative, son poids; son énergie mécanique se conserve.

b. $\mathscr{E}_m(B) = \mathscr{E}_m(C)$

soit : $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 + m \cdot g \cdot z_C$

avec $z_C = BC \cdot \sin \alpha$.

Donc : $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 + m \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha$.

$v_C = \sqrt{v_B^2 - 2 \cdot g \cdot BC \cdot \sin \alpha}$

$v_C = \sqrt{\left(\frac{57{,}0 \times 10^3}{3600}\right)^2 - 2 \times 9{,}81 \times 6{,}40 \times \sin(14{,}0)}$

$v_C = 14{,}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 53{,}4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

6. Entre B et D : $\mathscr{E}_m(B) = \mathscr{E}_m(D)$

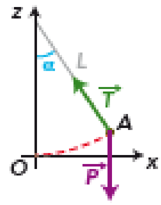
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_D^2 + m \cdot g \cdot z_D$$

$$z_D = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_B^2 - v_D^2}{g}\right)$$

$$z_D = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\left(\frac{57{,}0 \times 10^3}{3600}\right)^2 - \left(\frac{51{,}0 \times 10^3}{3600}\right)^2}{9{,}81}\right) = 2{,}55 \text{ m}$$

27 Le pendule de Foucault

1. La sphère est soumise à son poids, $\vec{P}$, et à la tension du fil, $\vec{T}$.



2. a. Son énergie mécanique reste constante au cours du temps.

b. Il y a transfert complet de l'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique, puis inversement.

3. a. $\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_c(A) + \mathscr{E}_{pp}(A) = \mathscr{E}_{pp}(A)$

$\mathscr{E}_{pp}(A) = m \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \alpha)$

b. $\mathscr{E}_m(O) = \mathscr{E}_c(O) + \mathscr{E}_{pp}(O) = \mathscr{E}_c(O) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$

4. $m \cdot g \cdot L \cdot (1 - \cos \alpha) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$,

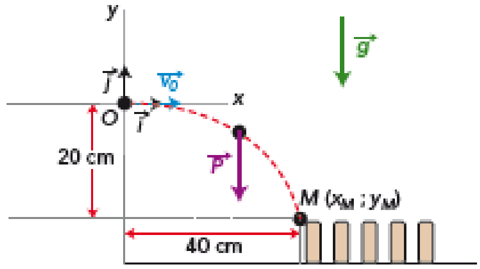
soit : $\cos \alpha = 1 - \frac{v_0^2}{2 g \cdot L} = 9{,}99 \times 10^{-1}$,

donc : $\alpha = 2{,}56°$.

5. Avec son pendule, FOUCAULT a mis évidence la rotation de la Terre sur elle-même.

28 Les dominos

1. a. La bille est soumise uniquement à son poids, $\vec{P}$, entre les points O et M exclus.



b. Le système {bille} est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen. La deuxième loi de Newton s'écrit :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a},$$

d'où : $\vec{P} = m \cdot \vec{a} \Leftrightarrow m \cdot \vec{g} = m \cdot \vec{a}$.

Finalement : $\vec{a} = \vec{g}$.

c. En prenant une primitive, on obtient :

$$\vec{v}\begin{pmatrix} v_x = v_0 \\ v_y = -g \cdot t \end{pmatrix}$$

puisque à $t = 0$ $\quad \vec{v_0}\begin{pmatrix} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \end{pmatrix}$

d.

On a $\begin{cases} v_x = v_0 = \dfrac{dx}{dt} \\ v_y = -g \cdot t = \dfrac{dy}{dt} \end{cases}$

donc $\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t + C_1 \\ y(t) = -\dfrac{1}{2} g \cdot t^2 + C_2 \end{cases}$

D'après les conditions initiales :

$$\begin{cases} x(0) = 0 = C_1 \\ y(0) = 0 = C_2 \end{cases}$$

Finalement : $\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = -\dfrac{1}{2} g \cdot t^2 \end{cases}$

Pour obtenir l'équation de la trajectoire, on isole le temps « t » de la première équation que l'on reporte dans la seconde :

$$t = \frac{x}{v_0} \longrightarrow y(x) = -\frac{1}{2} g \cdot \left(\frac{x}{v_0}\right)^2$$

e. Au point M : $\quad y_M = -\dfrac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot v_0^2}$

soit : $\quad v_0^2 = -\dfrac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot y_M}$

En remarquant que $y_M < 0$ et en ne conservant que la valeur positive de v_0, il vient :

$$v_0 = \sqrt{-\frac{g \cdot x_M^2}{2 \cdot y_M}}$$

$$v_0 = \sqrt{-\frac{10 \times 0{,}40^2}{2 \times (-0{,}20)}} = \sqrt{\frac{10 \times 0{,}40^2}{0{,}40}} = \sqrt{4{,}0} = 2{,}0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

2. a. Seul le poids travaille, car il n'est pas perpendiculaire au déplacement.

b. L'énergie mécanique de la bille se conserve entre A et B.

c. $\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_c(A) + \mathscr{E}_{pp}(A)$

En tenant compte du choix de l'origine de l'énergie potentielle de pesanteur au point O et sachant que $v_A = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, on a :

$$\mathscr{E}_m(A) = m \cdot g \cdot y_A$$

d. $\mathscr{E}_m(B) = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot y_B$

Or, $y_B = 0$ m, donc $\mathscr{E}_m(B) = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$

e. $\mathscr{E}_m(A) = \mathscr{E}_m(B)$

soit : $\quad m \cdot g \cdot y_A = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2$

Or, $v_0 = v_B$. Donc $y_A = \dfrac{v_0^2}{2 \cdot g}$

f. $y_A = \dfrac{2{,}0^2}{2 \times 10} = 0{,}20$ m

29 Le grand huit

1. L'altitude du wagon est $z = R \cdot (1 - \cos \theta)$.

2. Le wagon n'est soumis qu'à son poids, force conservative, donc l'énergie mécanique se conserve au cours du mouvement :

$$\mathscr{E}_m(\text{initiale}) = \mathscr{E}_m(M)$$

Le wagon part sans vitesse initiale, son énergie cinétique au départ est donc nulle.

L'origine de l'énergie potentielle de pesanteur est choisie en $z = 0$:

$$\mathscr{E}_{pp}(\text{initiale}) = m \cdot g \cdot H,$$

soit : $\quad \mathscr{E}_m(\text{initiale}) = m \cdot g \cdot H.$

En M :

$$\mathscr{E}_m(M) = \mathscr{E}_c(M) + \mathscr{E}_{pp}(M) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot z_M$$

Donc : $\mathscr{E}_m(M) = \dfrac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot R \cdot (1 - \cos \theta)$

La conservation de l'énergie mécanique permet d'écrire :

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_M^2 + m \cdot g \cdot R \cdot (1 - \cos \theta) = m \cdot g \cdot H$$

On en déduit :

$$v_M = \sqrt{2 g \cdot (H - R \cdot (1 - \cos \theta))}$$

3. Au sommet S de la boucle :

$$\theta = \pi, \quad \text{donc } v_S = \sqrt{2 g \cdot (H - 2R)}$$

4. À partir de la relation trouvée à la question 3, on déduit que :

$$H = \frac{v_S^2}{2g} + 2R$$

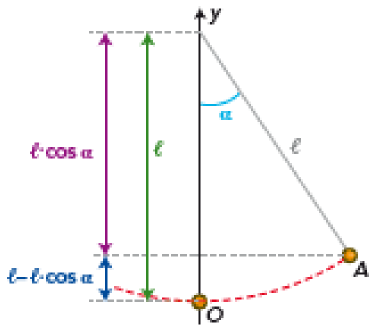
$$H = \frac{13{,}8^2}{2 \times 9{,}81} + 2 \times 19 = 48 \text{ m}.$$

30 Le pendule électrostatique

1. a. $W_{OA}(\vec{P}) = \vec{P} \cdot \overrightarrow{OA} = P \cdot OA \cdot \cos \alpha$

où $\cos \alpha = \dfrac{(y_O - y_A)}{OA}$

Donc $W_{OA}(\vec{P}) = P \cdot (y_O - y_A) = m \cdot g \cdot (y_O - y_A)$



$y_O - y_A = -\ell \cdot (1 - \cos \alpha)$,

soit $W_{OA}(\vec{P}) = -m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos \alpha)$.

b. $W_{OA}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{OA} = q \cdot \vec{E} \cdot \overrightarrow{OA} = q \cdot E \cdot \ell \cdot \sin \alpha$

2. $\Delta\mathscr{E}_{pp} = -W_{OA}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos \alpha)$

$\Delta\mathscr{E}_{pé} = -W_{OA}(\vec{F}) = -q \cdot E \cdot \ell \cdot \sin \alpha$