

Exercice 1 : (31)

① Q1. le référentiel R_v n'est pas en mouvement rectiligne uniforme par rapport au référentiel terrestre galiléen.
($\vec{a} \neq \vec{0}$)

1 Il ne peut donc pas être considéré comme galiléen.

③ Q2. Bilan des forces sur le système {voiture} dans R_v :

0,5 * poids $\vec{P} = mg\vec{u}_y$

0,5 * réaction normale : $\vec{R}_v$

0,5 * force d'inertie d'entraînement : $\vec{f}_{ie} = m\vec{a}_{\vec{u}_x}$

1 * force de rappel élastique $\vec{F}_d = -k(l - L_0)\vec{u}_x$
or d'après le repère $l = x \Rightarrow \vec{F}_d = -k(x - L_0)\vec{u}_x$

0,5 * force de frottement fluide : $\vec{f} = -bV\vec{u}_x$

④ Q3 On applique le AFD à $\{m\}$ dans R_v
1 en tenant compte de $\vec{f}_{ie}$:

$$m\vec{a}_{/R_v} = \vec{P} + \vec{R}_v + \vec{f}_{ie} + \vec{F}_d + \vec{f}$$

0,5 En projetant suivant Ox :

$$m \vec{a}_{/R_V} \cdot \vec{u}_x = \underbrace{\vec{P} \cdot \vec{u}_x}_{=0} + \underbrace{\vec{R}_N \cdot \vec{u}_x}_{=0} + \vec{f}_{ie} \cdot \vec{u}_x + \vec{F}_d \cdot \vec{u}_x + \vec{f}$$

$$0,5 \quad m a_{x/R_V} = ma - k(x - L_0) - b \frac{dx}{dt}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = ma - k(x - L_0) - b \frac{dx}{dt}$$

$$0,5 \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} (x - L_0) = a$$

$$0,5 \quad \text{En posant } X = x - L_0 :$$

$$\boxed{\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dX}{dt} + \frac{k}{m} X = a}$$

$$\text{Par identification : } \begin{cases} \omega_0^2 = \frac{k}{m} \\ \frac{\omega_0}{Q} = \frac{b}{m} \Rightarrow Q = \frac{m \omega_0}{b} \end{cases}$$

$$\wedge \quad \boxed{\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}} \quad \text{et} \quad \text{pulsation propre}$$

$$\boxed{Q = \frac{\sqrt{km}}{b}} \quad \text{facteur de qualité}$$

$$\textcircled{1} \quad Q4. \quad \text{Pour } t \leq 0 \quad X = x - L_0 = l - L_0 = 0$$

d'après l'énoncé.

$$\textcircled{1} \quad Q5. \quad \text{Au bout d'un temps suffisamment long, un régime permanent est atteint tel que } \dot{X} = 0 \text{ et } \ddot{X} = 0$$

1 d'où

$$\lim_{t \text{ long}} X = \frac{a}{\omega_0^2}$$

(2) Q6. 1 $a = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \left| \frac{0 - V}{t_0 - 0} \right| \Rightarrow a = \frac{V}{t_0}$

AN : 1 $a = \frac{90 \cdot 10^3}{3600 \cdot 2,5} = \underline{10 \text{ m.s}^{-2}}$

(3) Q7. 1 Pour un facteur de qualité égal à $1/2$, le régime est dit "critique".

Polynôme caractéristique de l'équation homogène
 $r^2 + \frac{b}{m}r + \frac{k}{m} = 0$ qui admet pour

racine double $r_0 = -\frac{b}{2m} = -\frac{1}{2} \frac{\omega_0}{Q} = -\omega_0$

1 Solution particulière $X(t) = a/\omega_0^2$

$\Rightarrow$ La solution générale est de la forme :

1 $X(t) = (At + B)e^{-\omega_0 t} + \frac{a}{\omega_0^2}$

(3) Q8 $\frac{dX}{dt} = Ae^{-\omega_0 t} + (At + B)(-\omega_0)e^{-\omega_0 t}$

On détermine les constantes A et B avec les conditions initiales :

$$X(0) = 0 \quad \text{et} \quad \left. \frac{dX}{dt} \right|_0 = 0$$

$$\wedge \begin{cases} 0 = (A \cdot 0 + B) e^0 + \frac{a}{\omega_0^2} \\ 0 = A e^0 + (A \cdot 0 + B)(-\omega_0) e^0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow B + \frac{a}{\omega_0^2} = 0 \quad \text{et} \quad A - B\omega_0 = 0$$

$$\wedge B = -\frac{a}{\omega_0^2} \quad \text{et} \quad A = -\frac{a}{\omega_0}$$

$$X(t) = \left(-\frac{a}{\omega_0} t - \frac{a}{\omega_0^2} \right) e^{-\omega_0 t} + \frac{a}{\omega_0^2}$$

$$\wedge X(t) = \frac{a}{\omega_0^2} \left(1 - (1 + \omega_0 t) e^{-\omega_0 t} \right)$$

⬆ Q9. le temps caractéristique de retour à l'équilibre est d'environ 5 τ avec
 $\wedge \tau = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{m}{k}}$

⬆ Q10. lorsque $\vec{f}_{ie}$ n'est plus présente le système est régi par l'équation :

$$0,5 \quad \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dX}{dt} + \omega_0^2 X = 0 \quad (\text{eq. homogène})$$

Comme on est en régime critique, la solution est de la forme :

$$0,5 \quad X(t) = (Ct + D) e^{-\omega_0 t}$$

Conditions initiales : $X(t_0) = \frac{a}{\omega_0^2}$

1

$$\frac{dX}{dt}(t_0) = 0$$

$$X(t_0) = (Ct_0 + D) e^{-\omega_0 t_0} = \frac{a}{\omega_0^2}$$

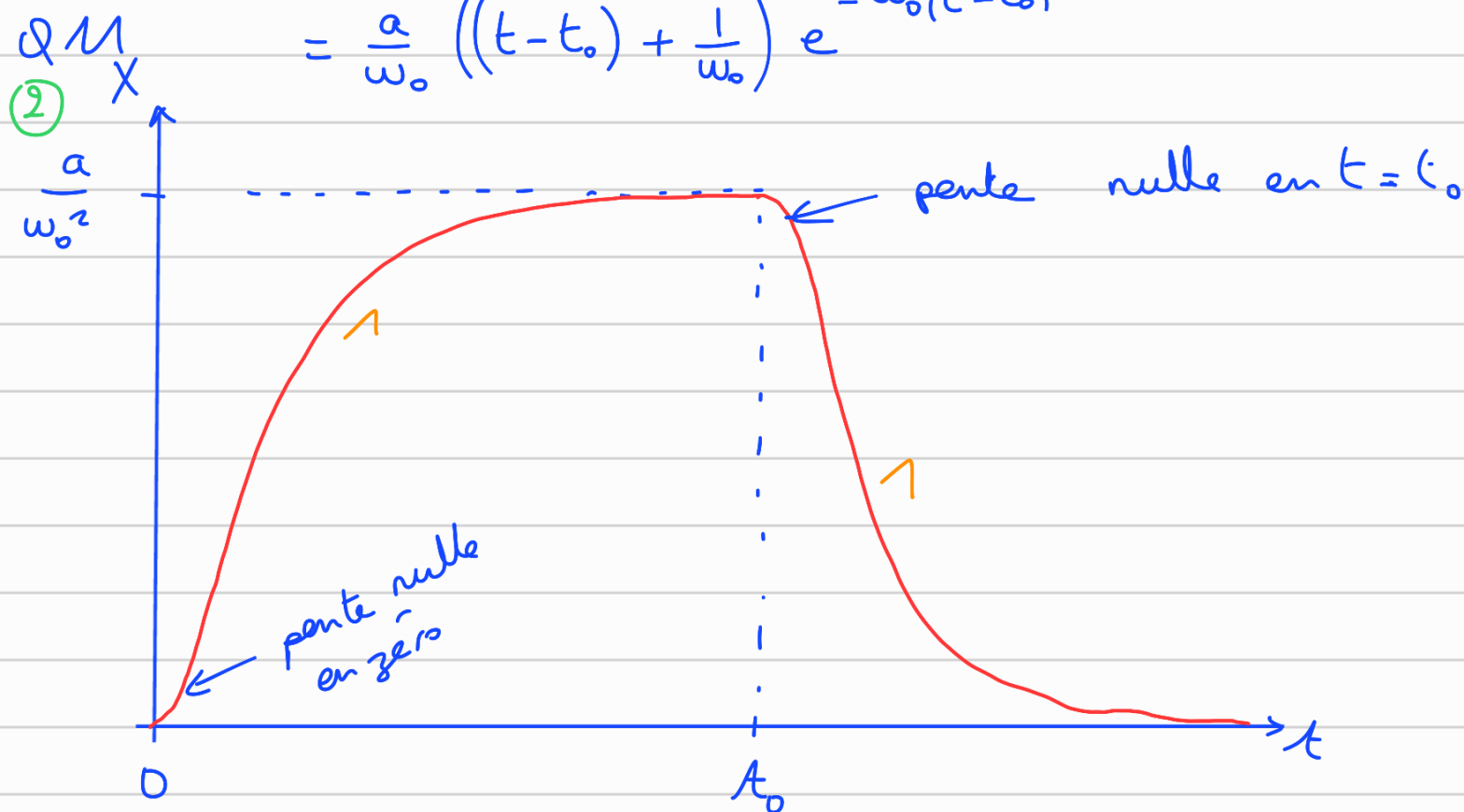
$$\dot{X}(t) = C e^{-\omega_0 t} - (Ct + D) \omega_0 e^{-\omega_0 t}$$

$$\dot{X}(t_0) = C e^{-\omega_0 t_0} - \underbrace{(Ct_0 + D) \omega_0 e^{-\omega_0 t_0}}_{= a/\omega_0} = 0$$

1 $C e^{-\omega_0 t_0} = \frac{a}{\omega_0} \Rightarrow C = \frac{a}{\omega_0} e^{\omega_0 t_0}$

$$\frac{a t_0}{\omega_0} + D e^{-\omega_0 t_0} = \frac{a}{\omega_0^2} \Rightarrow D = \frac{a}{\omega_0} e^{\omega_0 t_0} \left(\frac{1}{\omega_0} - t_0 \right)$$

1
$$X(t) = \left[\frac{a}{\omega_0} t e^{\omega_0 t} + \frac{a}{\omega_0} e^{\omega_0 t_0} \left(\frac{1}{\omega_0} - t_0 \right) \right] e^{-\omega_0 t}$$
$$= \frac{a}{\omega_0} \left((t - t_0) + \frac{1}{\omega_0} \right) e^{-\omega_0 (t - t_0)}$$



Rq : on peut aussi faire un changement d'origine des temps : $\begin{cases} X(0) = \frac{a}{\omega_0^2} \\ \frac{dX}{dt}(0) = 0 \end{cases}$

$$X(0) = (C \cdot 0 + D) e^{-\omega_0 \cdot 0} = \frac{a}{\omega_0^2}$$

$$\Rightarrow D = \frac{a}{\omega_0^2}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}(0) &= C e^{-\omega_0 \cdot 0} - (C \cdot 0 + D) \omega_0 e^{-\omega_0 \cdot 0} \\ &= C - \frac{a}{\omega_0} = 0 \Rightarrow C = \frac{a}{\omega_0} \end{aligned}$$

$$X(t') = \left(\frac{at'}{\omega_0} + \frac{a}{\omega_0^2} \right) e^{-\omega_0 t'} \quad \text{avec } t' = t - t_0 \text{ on a}$$

$$X(t) = \left(\frac{a}{\omega_0} (t - t_0) + \frac{a}{\omega_0^2} \right) e^{-\omega_0 (t - t_0)} \quad \text{idem ci-dessus}$$

Q12. $\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} X + \omega_0^2 X = a$

Polynôme caractéristique : $r^2 + \frac{\omega_0}{Q} r + \omega_0^2 = 0$

$$\Delta = \left(\frac{\omega_0}{Q} \right)^2 - 4\omega_0^2 = 4\omega_0^2 \left(\frac{1}{4Q^2} - 1 \right)$$

le régime est pseudo-périodique si $\Delta < 0$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{4Q^2} - 1 < 0 \Leftrightarrow 4Q^2 > 1$$

$$\Leftrightarrow Q^2 > \frac{1}{4}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{Q > \frac{1}{2}} \quad (\text{car } Q > 0)$$

Racines complexes :

q5 $r_{1,2} = \frac{-\omega_0}{2Q} \pm j\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$

1 On pose $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$

La solution générale de l'équation homogène est

1 $X(t) = \left(A \cos(\Omega t) + B \sin(\Omega t) \right) e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}}$ $\left(+ \frac{a}{\omega_0^2} \text{ pour sol complète} \right)$

2 Q13 Le temps caractéristique d'amortissement des oscillations est environ $5\tau = \frac{10Q}{\omega_0}$

1 AN : $5\tau = \frac{10 \cdot 10}{20} = 5 \text{ s}$

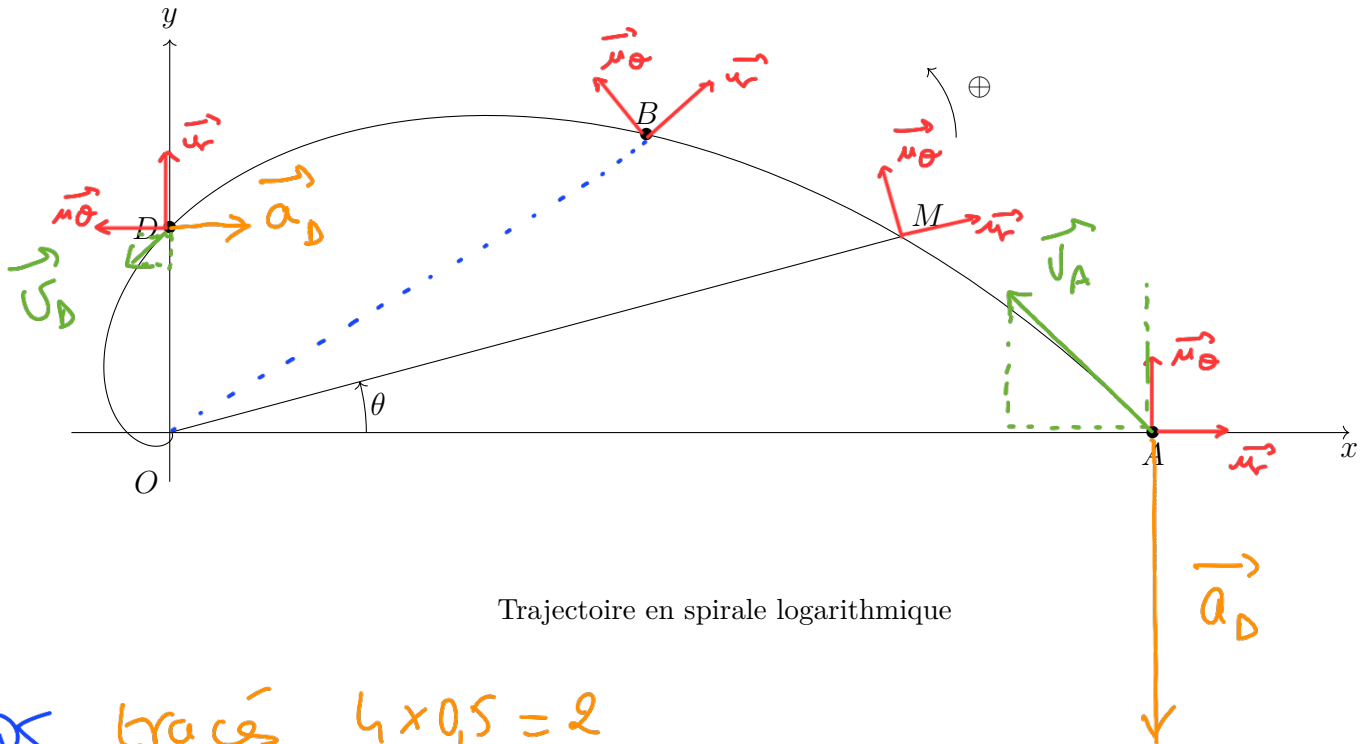
1 Le régime permanent ne sera donc pas atteint avant la fin du choc brutal dont on peut supposer la durée $< 1 \text{ s}$.

$\Rightarrow$ Dispositif pas adapté puisqu'il ne déclenchera pas l'airbag suffisamment tôt.

Annexe à rendre avec la copie

Exercice 2 :

(23)

Q1. 1 pour $\vec{u}$ (2) 1 pour $\vec{u}_\theta$ 

Trajectoire en spirale logarithmique

Q5 traces $4 \times 0,5 = 2$ (5) Echelles pour ω : $a\omega =$ pour a : $a\omega^2 =$

$$\vec{u}_A = a\omega \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \vec{a}_A = a\omega^2 \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \end{pmatrix}$$

$$\vec{u}_D = a\omega \begin{pmatrix} -0,21 \\ 0,21 \end{pmatrix} \quad \vec{a}_D = a\omega^2 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,42 \end{pmatrix}$$

Q2. 0,5 $\vec{ON} = r \vec{u}_r$

0,5 $\vec{v} = \dot{r} \vec{u}_r + r \dot{\theta} \vec{u}_\theta$

avec $r = a e^{-\omega t}$ on obtient :

$$\vec{v} = -a\omega e^{-\omega t} \vec{u}_r + a\omega e^{-\omega t} \vec{u}_\theta$$

1 $\vec{v} = a\omega e^{-\omega t} (\vec{u}_\theta - \vec{u}_r)$

1 $\vec{a} = -a\omega^2 e^{-\omega t} (\vec{u}_\theta - \vec{u}_r) + a\omega e^{-\omega t} (-\omega \vec{u}_r - \omega \vec{u}_\theta)$

$$\vec{a} = a\omega^2 e^{-\omega t} (-\vec{u}_\theta - \vec{u}_\theta + \vec{u}_r - \vec{u}_r)$$

1 $\vec{a} = -2a\omega^2 e^{-\omega t} \vec{u}_\theta$

Q3. 1 $\|\vec{v}\| = a\omega e^{-\omega t} \times \sqrt{2}$

(2)

1 v dépend de t donc le mouvement n'est pas uniforme.

Q4. En A $\theta = 0$ donc $\omega t = 0$

(3)

1 $\Rightarrow \vec{v}_A = a\omega (\vec{u}_\theta - \vec{u}_r)$

et 1 $\vec{a}_A = -2a\omega^2 \vec{u}_\theta$

En D $\theta = \frac{\pi}{2}$ donc $\omega t = \frac{\pi}{2}$

$\Rightarrow \vec{v}_D = a\omega e^{-\pi/2} (\vec{u}_\theta - \vec{u}_r)$

et $\vec{a}_D = -2 a\omega^2 e^{-\pi/2} \vec{u}_\theta$

En A et D $\vec{v} \cdot \vec{a} < 0$ donc le mouvement est ralenti.

Q6. $\|\vec{v}\| = v_0$

or $\vec{v} = -a\dot{\theta} e^{-\theta} \vec{u}_r + a\dot{\theta} e^{-\theta} \vec{u}_\theta$

(en dérivant $\vec{on} = a e^{-\theta} \vec{u}_r$)

d'où $\|\vec{v}\| = \sqrt{2} a \dot{\theta} e^{-\theta}$

$\Rightarrow v_0 = \sqrt{2} a e^{-\theta} \frac{d\theta}{dt}$

On intègre les 2 membres de l'équation :

$\int_0^t v_0 dt = \sqrt{2} a \int_0^t e^{-\theta} \frac{d\theta}{dt} dt$

$[v_0 t]_0^t = \sqrt{2} a [-e^{-\theta}]_0^t$

$v_0 t = \sqrt{2} a (-e^{-\theta(t)} - (-e^{-\theta(0)}))$

$$v_0 t = \sqrt{2} a (1 - e^{-\theta})$$

$$\sqrt{2} a e^{-\theta(t)} = \sqrt{2} a - v_0 t$$

$$e^{-\theta(t)} = 1 - \frac{v_0}{a\sqrt{2}} t$$

$$-\theta(t) = \ln \left(1 - \frac{v_0}{a\sqrt{2}} t \right)$$

1

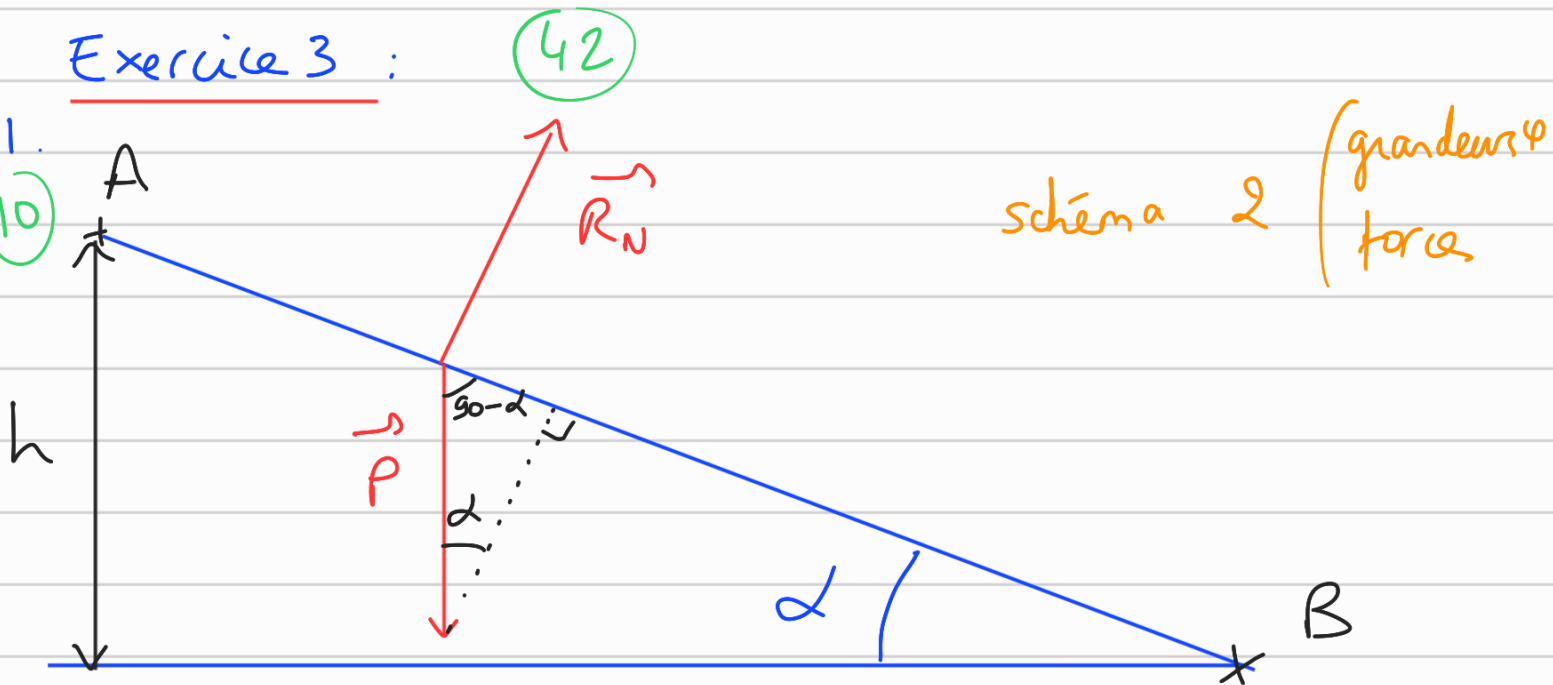
$$\theta(t) = \ln \frac{1}{1 - \frac{v_0}{a\sqrt{2}} t}$$

Exercice 3 :

(42)

Q1.

(10)



On étudie le système {passager} dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Bilan des actions mécaniques sur le système :

- * Poids $\vec{P}$
- * Réaction du support $\vec{R}_N$ (orthogonale au support car frottements négligés)

PFD appliqué au système {passager} de masse constante, dans R_T supposé galiléen :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R}_N$$

On utilise le système de coordonnées cartésiennes avec l'axe (Ox) dans la direction du toboggan et O au départ :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin \alpha \\ m\ddot{y} = 0 \\ m\ddot{z} = -mg \cos \alpha + R_N \end{cases}$$

Par intégrations successives on a :

$$\dot{x} = g \sin \alpha t + \dot{x}(0) \quad \text{avec } \dot{x}(0) = 0$$

(départ sans vitesse initiale)

$$\wedge \quad x(t) = \frac{1}{2} g \sin \alpha t^2 + x(0) \quad \text{avec } x(0) = 0$$

car 0 est l'origine du repère.

$$\text{Or } \sin \alpha = \frac{h}{x_B - x_0} \Rightarrow x_B = \frac{h}{\sin \alpha}$$

Le temps de passage en B (t_B) vérifie donc :

$$\wedge \quad \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{1}{2} g \sin \alpha t_B^2 \Rightarrow t_B = \sqrt{\frac{2h}{g \sin^2 \alpha}}$$

Sa vitesse est donc :

$$\dot{x}_B = g \sin \alpha \sqrt{\frac{2h}{g \sin^2 \alpha}}$$

$$\wedge \quad \text{Soit } \boxed{v_B = \sqrt{2gh}}$$

$$\wedge \quad \text{AN: } v_B = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 33} = 25,4 \text{ m.s}^{-1} = \underline{\underline{91,6 \text{ km/h}}}$$

② Q2. On applique le PFD au système en tenant compte des frottements :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R}$$

En projetant on obtient :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin\alpha - T \\ m\ddot{y} = 0 \\ m\ddot{z} = -mg\cos\alpha + N \end{cases}$$

le mouvement a lieu selon Ox donc
1 $z = \text{cte}$ d'où $\ddot{z} = 0$

1 $\Rightarrow \boxed{N = mg\cos\alpha}$

① Q3. Graphiquement, on lit $\mu = 0,24$
1 (utilisation d'une échelle pour être plus précis).

⑤ Q4. $\Rightarrow$ le passager arrive en bas si $v_B > 0$.

On cherche donc une expression de v_B en fonction de α .

D'après la loi de Coulomb $T = \mu mg\cos\alpha$

1 $\Rightarrow m\ddot{x} = mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha$

$$\ddot{x} = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)$$

En intégrant 2 fois avec les conditions initiales précédentes on a :

$$1 \quad x(t) = \frac{1}{2} g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) t^2$$

$$0,5 \quad \text{En B} \quad t_B = \sqrt{\frac{2x_B}{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}}$$

$$\text{D'où} \quad \dot{x}_B = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \sqrt{\frac{2x_B}{g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)}}$$

$$\text{avec} \quad x_B = \frac{h}{\sin \alpha}$$

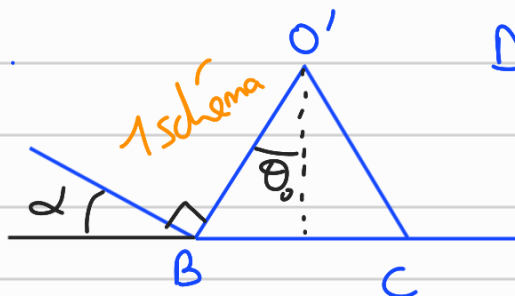
$$1 \Rightarrow v_B = \sqrt{2gh \left(1 - \frac{\mu}{\tan \alpha}\right)}$$

le passager arrive en bas si $v_B \geq 0$

$$\Rightarrow 1 - \frac{\mu}{\tan \alpha} > 0 \Rightarrow \tan \alpha > \mu$$

il faut donc $\alpha > \arctan \mu$ AN : $\alpha_{\min} = 13^\circ$

Q5.



Dans $\triangle O'BC$ isocèle $\widehat{CBO'} = \frac{\pi}{2} - \alpha$
 $\Rightarrow \widehat{O'CB} = \frac{\pi}{2} - \alpha$
 $\Rightarrow \widehat{BOC} = 2\alpha$
 $\Rightarrow \alpha = \theta_0$

⑤ Q6. Bilan des forces sur Π : $\vec{P} = m\vec{g}$
 $\vec{R} = -R\vec{u}_r$

avec $R > 0$

On applique le PFD au système $\{\Pi\}$ dans le référentiel terrestre galiléen :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R}$$

le mouvement est circulaire de rayon l

$$\Rightarrow \vec{ON} = l\vec{u}_r$$

$$\Rightarrow \vec{v} = l\dot{\theta}\vec{u}_\theta$$

$$\Rightarrow \vec{a} = l\ddot{\theta}\vec{u}_\theta - l\dot{\theta}^2\vec{u}_r$$

Dans la base polaire $\vec{P} = mg\cos\theta\vec{u}_r - mg\sin\theta\vec{u}_\theta$

D'où le système :

$$\begin{cases} -ml\dot{\theta}^2 = mg\cos\theta - R \\ ml\ddot{\theta} = -mg\sin\theta \end{cases}$$

Avec la projection sur $\vec{u}_\theta$ on obtient l'équation différentielle :

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\sin\theta = 0$$

③ Q7. Pour $\theta < 1$ rad. $\sin\theta \approx \theta$ et on obtient l'équation d'un oscillateur harmonique de pulsation propre $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$.

0,5 $\theta(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$.

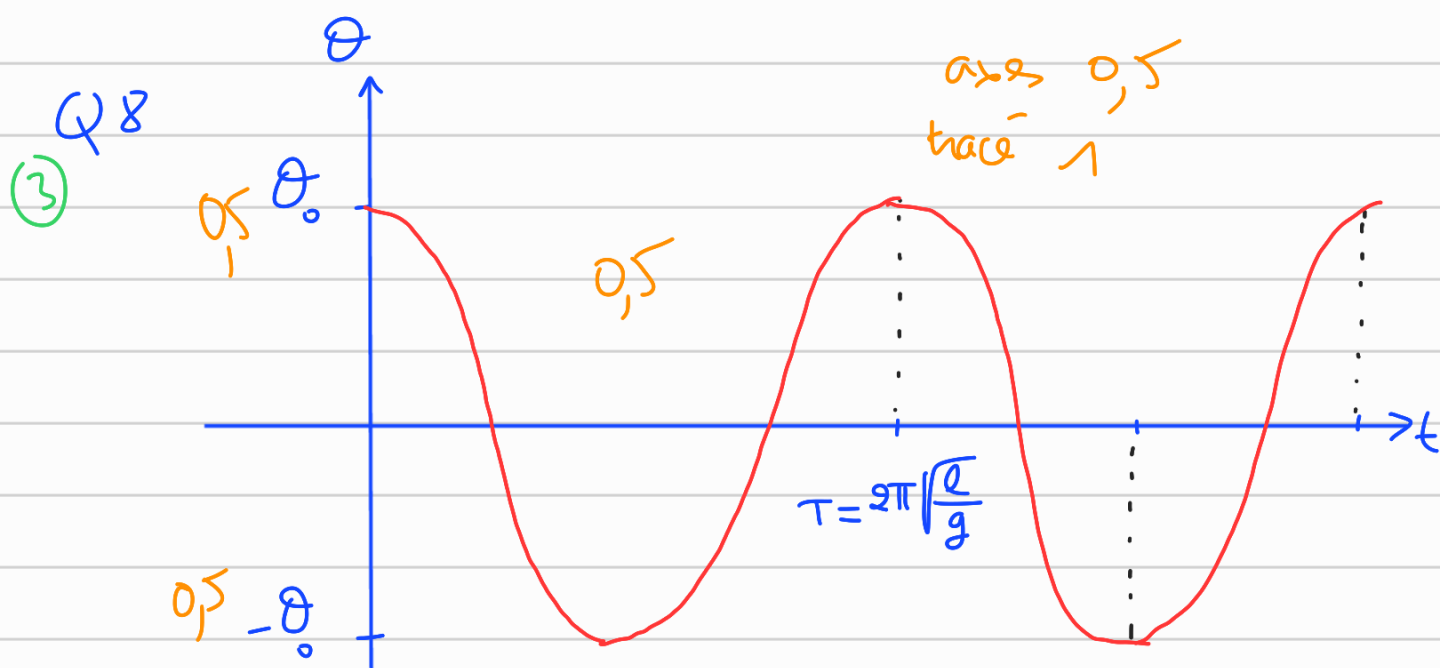
On détermine A et B avec les conditions initiales : $\theta(0) = \theta_0$ et $\dot{\theta}(0) = 0$

$\theta_0 = A$

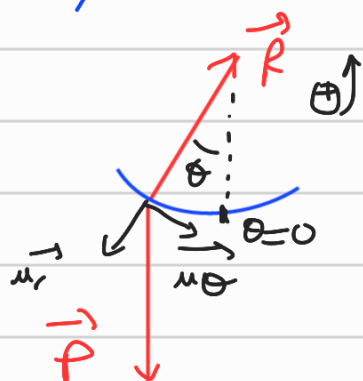
$\dot{\theta}(t) = -\theta_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + B \omega_0 \cos \omega_0 t$

1 $\dot{\theta}(0) = B \omega_0 = 0 \rightarrow B = 0$

$\theta(t) = \theta_0 \cos \omega_0 t$ avec $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$



Q9. Sur la partie BC le mouvement est circulaire, donc $\vec{a} = l \ddot{\theta} \vec{u}_\theta - l \dot{\theta}^2 \vec{u}_r$



Bilan des forces : $\vec{P} = m\vec{g} = mg\cos\theta\vec{u}_r - mg\sin\theta\vec{u}_\theta$
 $\vec{R} = R\vec{u}_r$

le PFD appliqué au système dans R_T galiléen et projeté selon $\vec{u}_\theta$ donne :

$$ml\ddot{\theta} = -mg\sin\theta$$

Soit $\ddot{\theta} = -\frac{g}{l}\sin\theta$

que l'on peut intégrer entre B et C

$$\int_B^C \ddot{\theta} \cdot \dot{\theta} dt = \int_B^C -\frac{g}{l}\sin\theta \cdot \dot{\theta} dt$$

$$\int_B^C \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \right) dt = \int_B^C -\frac{g}{l} \frac{d}{dt} (\cos\theta) dt$$

$$\frac{1}{2} \dot{\theta}_C^2 - \frac{1}{2} \dot{\theta}_B^2 = \frac{g}{l} \underbrace{(\cos\theta_C - \cos\theta_B)}_{=0}$$

$\Rightarrow \dot{\theta}_B = \dot{\theta}_C$ donc $\boxed{v_B = v_C}$ ($v = l\dot{\theta}$)

Q10. Après le point C, le système a un mouvement de chute libre avec

une vitesse initiale non nulle, telle que
 $\vec{v}_C = v_C \cos\alpha \vec{u}_x' + v_C \sin\alpha \vec{u}_y'$

On utilise une base cartésienne attachée au repère $(C'x'y'z')$ avec $\vec{u}_x'$ le vecteur unitaire d'un axe horizontal et $\vec{u}_y'$ le vecteur unitaire d'un axe vertical ascendant.

1 On a donc $m\vec{a} = m\vec{g}$

avec $\vec{a} \begin{pmatrix} \ddot{x}' \\ \ddot{y}' \\ \ddot{z}' \end{pmatrix}$ et $\vec{g} \begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{pmatrix}$

1
$$\begin{cases} \ddot{x}' = 0 \\ \ddot{y}' = -\frac{g}{m} \\ \ddot{z}' = 0 \end{cases}$$

En intégrant et en tenant compte de la vitesse en C (position où est prise l'origine des temps)

$$\begin{cases} \dot{x}'(t) = v_c \cos \alpha \\ \dot{y}'(t) = -\frac{g}{m} t + v_c \sin \alpha \\ \dot{z}'(t) = 0 \end{cases}$$

1
$$\begin{cases} x'(t) = v_c \cos \alpha t \\ y'(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_c \sin \alpha t + y_c \\ z'(t) = 0 \end{cases}$$

On résoud $y'(t) = 0 \Rightarrow -\frac{1}{2} g t^2 + v_c \sin \alpha t + y_c = 0$

$$\Delta = v_c^2 \sin^2 \alpha + 4 \cdot \frac{1}{2} g y_c = v_c^2 \sin^2 \alpha + 2g y_c$$

$$t_+ = \left(v_c \sin \alpha + \sqrt{v_c^2 \sin^2 \alpha + 2g y_c} \right) \frac{2}{g} \quad (\text{racine positive})$$

1
$$d = v_c \cos \alpha \left(v_c \sin \alpha + \sqrt{v_c^2 \sin^2 \alpha + 2g y_c} \right) \frac{1}{g}$$

$$\alpha = \pi/4 \Rightarrow \cos \alpha = \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$v_c = 25,4 \text{ m.s}^{-1}$$

$$g = 9,81$$

$$\Rightarrow d = \frac{25,4}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{9,81} \left(\frac{25,4}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{25,4^2}{2} + 2 \cdot 9,81 \cdot 1} \right)$$

1 $d = \underline{66,8 \text{ m}}$.

La distance réelle serait très inférieure à cause des frottements.