

Changements de référentiel

Prérequis

Principe fondamental. Mouvement relatif de référentiels. Forces d'inertie.

Constantes utiles

→ Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Avant toute chose



Entraînement 2.1 — Trajectoires et référentiels.

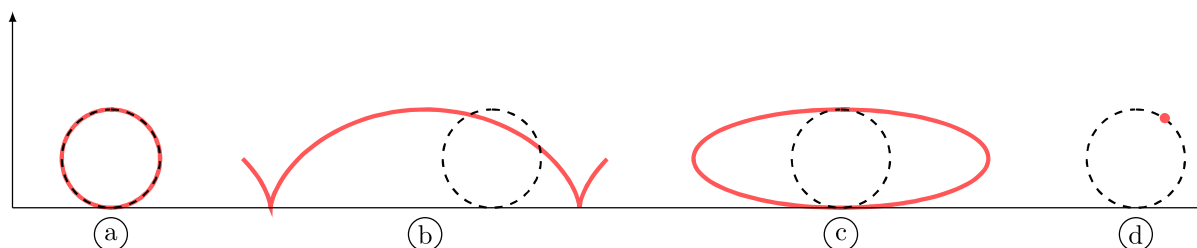


On s'intéresse ici au mouvement de la valve V d'une roue de vélo. En changeant de référentiel, la trajectoire de ce point peut être perçue de manière différente.

On définit trois référentiels :

- le référentiel $\mathcal{R}_1$ lié à la Terre,
- le référentiel $\mathcal{R}_2$ lié au cadre du vélo,
- le référentiel $\mathcal{R}_3$ lié à la roue du vélo.

Voici différentes trajectoires pour le point V.



Parmi les quatre trajectoires présentées ci-dessus, quelle est celle qui peut correspondre à un mouvement décrit dans :

a) le référentiel $\mathcal{R}_1$?

b) le référentiel $\mathcal{R}_2$?

c) le référentiel $\mathcal{R}_3$?

Entraînement 2.2 — Référentiel galiléen... ou pas (I) ?



Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel tout solide ne subissant aucune force extérieure est immobile ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen.

On considère un référentiel $\mathcal{R}_0(\text{O}, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ galiléen ainsi que les trois référentiels suivants :

- $\mathcal{R}_1(\text{O}', \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, en translation rectiligne uniforme par rapport à $\mathcal{R}_0$,
- $\mathcal{R}_2(\text{O}, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$, animé d'un mouvement de rotation uniforme par rapport à $\mathcal{R}_0$,
- $\mathcal{R}_3(\text{A}, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, en translation non uniforme par rapport à $\mathcal{R}_0$.

a) $\mathcal{R}_1$ est un référentiel galiléen : vrai ou faux ?

b) $\mathcal{R}_2$ est un référentiel galiléen : vrai ou faux ?

c) $\mathcal{R}_3$ est un référentiel galiléen : vrai ou faux ?

Entraînement 2.3 — Référentiel galiléen... ou pas (II) ?



Un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel tout solide ne subissant aucune force extérieure est animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Tout référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même galiléen.

Dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, on s'intéresse aux mouvements d'un train et de l'un des passagers à bord. On note $\mathcal{R}_t$ le référentiel lié au train et $\mathcal{R}_p$ le référentiel lié au passager à bord du train.

Dans chacune des situations proposées, indiquez quel(s) est (sont) le(s) référentiel(s) galiléen(s) parmi les options suivantes :

- (a) $\mathcal{R}_t$ et $\mathcal{R}_p$
- (b) ni $\mathcal{R}_t$ ni $\mathcal{R}_p$
- (c) uniquement $\mathcal{R}_t$
- (d) uniquement $\mathcal{R}_p$

a) Le train suit une ligne droite à vitesse constante ; le passager est assis sur son siège.

.....

b) Le train suit une courbe à vitesse constante ; le passager est assis sur son siège.

.....

c) Le train freine sur une ligne droite ; le passager marche le long du train à vitesse constante.

.....

d) Le train suit une courbe à vitesse constante ; le passager marche le long du train.

.....

Composition de mouvements

Entraînement 2.4 — Autour de l'accélération.



On considère un référentiel $\mathcal{R}$ galiléen lié au repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ et un référentiel $\mathcal{R}'$, lié au repère cylindrique $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$. Un point M, en mouvement dans ces deux référentiels, est repéré par ses coordonnées cylindriques habituelles r, θ et $z = 0$. L'angle θ suit la loi : $\theta = \omega t$ où ω est une constante.

• Caractérisation du mouvement de $\mathcal{R}'$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}$

a) Le vecteur rotation du référentiel $\mathcal{R}'$ par rapport au référentiel $\mathcal{R}$, $\vec{\Omega}$, vaut :

(a) $\theta \vec{e}_z$

(b) $-\dot{\theta} \vec{e}_x$

(c) $\omega \vec{e}_z$

(d) $\dot{\omega} \vec{e}_z$

.....

b) Le référentiel $\mathcal{R}'$ est galiléen.

(a) Vrai

(b) Faux

.....

• Composantes de l'accélération de M dans le référentiel $\mathcal{R}$

c) Par homogénéité, identifier l'expression de l'accélération radiale a_r de M dans $\mathcal{R}$ en coordonnées cylindriques.

(a) $\ddot{r} - r\dot{\theta}^2$

(b) $\dot{r} - r^2\dot{\theta}$

(c) $\ddot{r} - r^2\dot{\theta}^2$

(d) $\ddot{r} - r^2\dot{\theta}$

.....

d) Par homogénéité, identifier l'expression de l'accélération orthoradiale a_θ de M dans $\mathcal{R}$ en coordonnées cylindriques.

(a) $2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}$

(b) $2\ddot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}$

(c) $2\dot{r}\ddot{\theta} + r\ddot{\theta}$

(d) $2\dot{r}\ddot{\theta}$

.....

• Composition des accélérations

La loi de composition des accélérations assure que :

$$\vec{a}_{\mathcal{R}}(M) = \vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) + \vec{a}_e + \vec{a}_C,$$

avec $\vec{a}_{\mathcal{R}}(M) = \left. \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} \right|_{\mathcal{R}}$, $\vec{a}_{\mathcal{R}'}(M) = \left. \frac{d^2 \vec{OM}}{dt^2} \right|_{\mathcal{R}'}$ et, comme $\mathcal{R}'$ est en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à $\mathcal{R}$,

$$\vec{a}_e = \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{OM}) \quad \text{et} \quad \vec{a}_C = 2\vec{\Omega} \wedge \left. \frac{d\vec{OM}}{dt} \right|_{\mathcal{R}'}$$

e) Exprimer $\vec{a}_e$ en fonction de r, ω et d'un vecteur unitaire de la base cylindrique ..

f) Exprimer $\vec{a}_C$ en fonction de $\dot{r}, \omega$ et d'un vecteur unitaire de la base cylindrique ..

g) En déduire l'accélération $\vec{a}_{\mathcal{R}'}(M)$

Forces d'inertie

Entraînement 2.5 — Forces d'inertie à prendre en compte.



Le référentiel terrestre $\mathcal{R}_t$ est considéré galiléen. On considère l'étude d'une masse ponctuelle M dont on observe le mouvement dans différents référentiels $\mathcal{R}_i$ en mouvement par rapport à $\mathcal{R}_t$.

On définit les quatre référentiels suivants :

- $\mathcal{R}_1$ lié à un manège en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans $\mathcal{R}_t$,
- $\mathcal{R}_2$ lié à un paquebot en mouvement rectiligne uniforme dans $\mathcal{R}_t$,
- $\mathcal{R}_3$ lié à un train en phase de décélération uniforme en ligne droite dans $\mathcal{R}_t$.
- $\mathcal{R}_4$ lié à une caisse en chute libre dans $\mathcal{R}_t$.

L'étude du mouvement de M dans ces référentiels $\mathcal{R}_i$ amène à envisager de prendre en compte des forces d'inertie :

- | | |
|--|---|
| (a) force d'inertie d'entraînement centrifuge quand $\mathcal{R}_i$ est en rotation dans $\mathcal{R}_t$ | (c) force d'inertie d'entraînement quand $\mathcal{R}_i$ est en translation rectiligne dans $\mathcal{R}_t$ |
| (b) force d'inertie de Coriolis | (d) aucune force d'inertie |

Déterminer les forces d'inertie à prendre en compte dans les situations suivantes :

- | | |
|--|--|
| a) M est immobile dans $\mathcal{R}_1$ <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> | d) M est en mouvement dans $\mathcal{R}_3$.. <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> |
| b) M est en mouvement dans $\mathcal{R}_1$.. <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> | e) M est fixe dans $\mathcal{R}_3$ <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> |
| c) M est en mouvement dans $\mathcal{R}_2$.. <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> | f) M est en mouvement dans $\mathcal{R}_4$.. <input style="width: 100px; height: 30px;" type="text"/> |



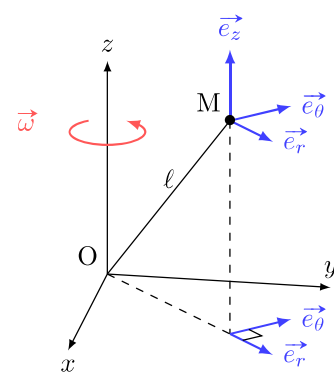
Entraînement 2.6 — Force d'inertie centrifuge.



Un point M de masse m est animé d'une vitesse $\vec{v}(M) = v\vec{e}_\theta$ dans un référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$ lié au repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. On étudie le mouvement de M dans le référentiel non galiléen $\mathcal{R}_1$ en rotation par rapport à $\mathcal{R}_0$ caractérisée par le vecteur rotation instantanée $\vec{\omega}$.

Une force d'inertie d'entraînement, ici centrifuge, s'exerce sur le point M : $\vec{f}_{ie} = m\omega^2\vec{HM}$, où H est le projeté orthogonal de M sur l'axe de rotation. La distance OM vaut ℓ .

Déterminer, dans la base $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$, l'expression de la force d'inertie centrifuge dans les situations suivantes.



- | | |
|---|---|
| a) $\vec{\omega} = \omega_0\vec{e}_z$ et le point M est placé sur l'axe (Oz) | <input style="width: 100%; height: 30px;" type="text"/> |
| b) $\vec{\omega} = \omega_0\vec{e}_z$ et le point M possède les coordonnées cylindriques $(\ell, 0, 0)$... | <input style="width: 100%; height: 30px;" type="text"/> |
| c) $\vec{\omega} = \omega_0\vec{e}_z$ et $\vec{OM}$ est incliné de $\frac{\pi}{3}$ par rapport à (Oz) | <input style="width: 100%; height: 30px;" type="text"/> |

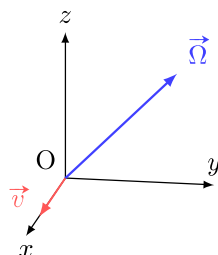


Entraînement 2.7 — Force de Coriolis (I).



L'étude du mouvement d'un point M est réalisée dans un référentiel non galiléen $\mathcal{R}_1$, en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$.

Ce point matériel M de masse m possède un vecteur vitesse $\vec{v} = v_1 \vec{e}_x$ dans $\mathcal{R}_1$, quand il passe en O. Le vecteur rotation de $\mathcal{R}_1$ par rapport à $\mathcal{R}_0$ vaut $\vec{\Omega} = \Omega_0(\vec{e}_y + \vec{e}_z)$.



On rappelle l'expression de la force d'inertie de Coriolis : $\vec{f}_{iC} = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$.

La force de Coriolis subie par le point M en O vaut :

(a) $\vec{f}_{iC} = 2mv_1\Omega_0(-\vec{e}_y - \vec{e}_z)$

(c) $\vec{f}_{iC} = 2mv_1\Omega_0(-\vec{e}_y + \vec{e}_z)$

(b) $\vec{f}_{iC} = 2mv_1\Omega_0(\vec{e}_y + \vec{e}_z)$

(d) $\vec{f}_{iC} = 2mv_1\Omega_0(\vec{e}_y - \vec{e}_z)$

☐

Entraînement 2.8 — Force de Coriolis (II).



Un point M de masse m est animé d'une vitesse $\vec{v}(M)$ dans un référentiel non galiléen $\mathcal{R}$ en rotation par rapport à un référentiel galiléen $\mathcal{R}_0$. Le vecteur rotation de $\mathcal{R}$ dans $\mathcal{R}_0$ est noté $\vec{\omega}$.

Dans chacun des cas suivants, déterminer l'expression de la force de Coriolis définie par

$$\vec{f}_{iC} = -2m\vec{\omega} \wedge \vec{v}(M).$$

• **Premier cas : on étudie le mouvement de M dans la base cartésienne.**

a) $\vec{v}(M) = v_1 \vec{e}_y$ et $\vec{\omega} = \omega_0 \vec{e}_z$

b) $\vec{v}(M) = v_1 \vec{e}_y + v_2 \vec{e}_z$ et $\vec{\omega} = \omega_0 \vec{e}_x$

• **Deuxième cas : on étudie le mouvement de M dans la base cylindrique.**

c) $\vec{v}(M) = v_1 \vec{e}_r$ et $\vec{\omega} = \omega_0 \vec{e}_z$

d) $\vec{v}(M) = v_1 \vec{e}_\theta + v_2 \vec{e}_z$ et $\vec{\omega} = \omega_0 \vec{e}_z$



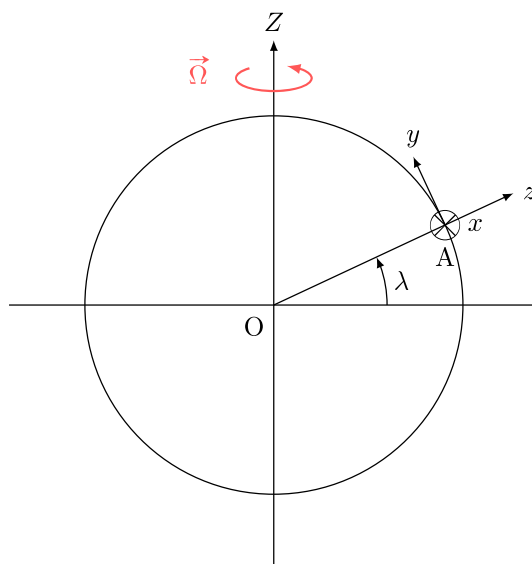
Entraînement 2.9 — Force de Coriolis dans le référentiel terrestre.



On s'intéresse au référentiel terrestre $\mathcal{R}_t$, lié au repère $(A, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$. Ce référentiel est en rotation autour de l'axe (O, Z) par rapport au référentiel géocentrique $\mathcal{R}_g$, supposé galiléen. Le mouvement de rotation de $\mathcal{R}_t$ par rapport à $\mathcal{R}_g$ est caractérisé par le vecteur rotation $\vec{\Omega} = \Omega \vec{e}_z$.

Le point A est repéré par sa latitude λ .

Ces référentiels sont représentés ci-dessous.



a) Quelle est la valeur numérique de Ω ?

- (a) $2,6 \times 10^{-2} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- (b) $1,7 \times 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- (c) $7,3 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

.....

b) Parmi les projections du vecteur $\vec{\Omega}$ dans la base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, laquelle est correcte ?

(a) $\Omega \begin{pmatrix} 0 \\ \sin \lambda \\ \cos \lambda \end{pmatrix}$

(c) $\Omega \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \lambda \\ \sin \lambda \end{pmatrix}$

(b) $\Omega \begin{pmatrix} \cos \lambda \\ 0 \\ \sin \lambda \end{pmatrix}$

.....

On s'intéresse au mouvement d'un point M de masse m dans le référentiel terrestre $\mathcal{R}_t$; on suppose qu'il est animé d'une vitesse $\vec{v}(M) = \dot{z} \vec{e}_z$.

On rappelle l'expression de la force de Coriolis subie par M dans $\mathcal{R}_t$:

$$\vec{f}_{iC} = -2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}(M).$$

c) Exprimer $\vec{f}_{iC}$ en fonction de m , Ω , $\dot{z}$ et d'un vecteur de la base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

.....

Dynamique

Entraînement 2.10 — Pendule en rotation.

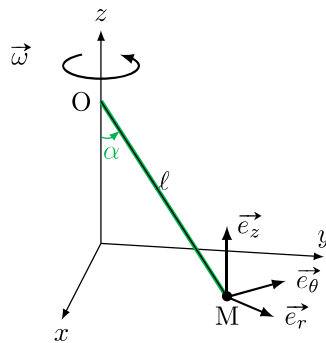


On s'intéresse à un pendule composé d'une tige (masse négligeable, longueur $\ell = 1,0 \text{ m}$) et d'une bille placée en M de masse m . Ce pendule est fixé en O à un axe vertical en rotation uniforme à la vitesse angulaire $\vec{\omega} = \omega \vec{e}_z$. Sous l'action de la rotation, le pendule s'incline d'un angle α par rapport à la verticale tout en restant dans le plan $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_z)$.

On rappelle que la force d'inertie centrifuge vaut

$$\vec{f}_{ie} = m\omega^2 \overrightarrow{HM},$$

où H est le projeté orthogonal de M sur l'axe de rotation.



a) La force centrifuge subie par le point M vaut :

- (a) $\vec{f}_{ie} = -m\omega^2 \overrightarrow{OM}$
- (b) $\vec{f}_{ie} = m\omega^2 \ell \sin(\alpha) \vec{e}_z$
- (c) $\vec{f}_{ie} = m\omega^2 \ell \sin(\alpha) \vec{e}_r$
- (d) $\vec{f}_{ie} = -m\omega^2 \ell \vec{e}_\theta$

.....

b) Par homogénéité, déterminer la relation qui lie ω et α :

- (a) $\omega = \frac{\ell}{g\sqrt{\cos \alpha}}$
- (b) $\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell \cos \alpha}}$
- (c) $\omega = \frac{g}{\ell} \sqrt{\cos \alpha}$
- (d) $\omega = \sqrt{\frac{\ell}{g} \cos \alpha}$

.....

c) Déterminer pour quelle valeur de la vitesse angulaire ω l'angle α vaut 45°



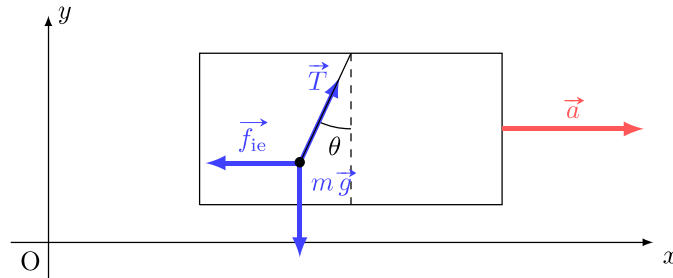
Entraînement 2.11 — Un pendule sur une voiture.



On s'intéresse à un pendule de masse $m = 5 \text{ g}$ suspendu au rétroviseur d'une voiture animée pour $t < 0$ d'une vitesse $\vec{v} = v_0 \vec{e}_x$ constante dans le référentiel terrestre (galiléen) $\mathcal{R}_0(\text{O}, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$.

À $t = 0$, le véhicule accélère avec une accélération $\vec{a} = a \vec{e}_x$ constante, avec $a = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

L'étude du mouvement du pendule est menée dans le référentiel $\mathcal{R}_1$ lié à la voiture.



On rappelle que la force d'inertie d'entraînement vaut $\vec{f}_{ie} = -m\vec{a}$. Sous l'action de cette force, le pendule se stabilise pour une valeur particulière de l'angle θ notée θ_e .

a) Déterminer $\frac{f_{ie}}{P}$, le rapport de la norme de $\vec{f}_{ie}$ sur celle du poids

b) La force d'inertie d'entraînement est négligeable devant le poids.

(a) vrai

(b) faux

.....

c) Décomposer le vecteur $\vec{P}$ dans la base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$

d) Décomposer le vecteur $\vec{T}$ dans la base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$

e) Décomposer le vecteur $\vec{f}_{ie}$ dans la base $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$

f) Parmi les quatre expressions du principe fondamental appliqué à la bille, dans le référentiel de la voiture, laquelle est juste ?

(a) $m \frac{d\vec{v}}{dt} \Big|_{\mathcal{R}_1} = \vec{P} + \vec{T}$

(c) $m \frac{d\vec{v}}{dt} \Big|_{\mathcal{R}_1} = \vec{P} + \vec{T} + m\vec{a}$

(b) $m \frac{d\vec{v}}{dt} \Big|_{\mathcal{R}_1} + \vec{f}_{ie} = \vec{P} + \vec{T}$

(d) $m \frac{d\vec{v}}{dt} \Big|_{\mathcal{R}_1} = \vec{P} + \vec{T} + \vec{f}_{ie}$

.....

g) L'application du principe fondamental permet d'exprimer la position d'équilibre du pendule. Parmi les trois propositions, laquelle est homogène ?

(a) $\tan(\theta_e) = \frac{g}{ma}$

(b) $\tan(\theta_e) = \frac{a}{g}$

(c) $\tan(\theta_e) = mag$

.....

h) Grâce à la relation trouvée à la question précédente, calculer θ_e en degrés

 Entraînement 2.12 — Palet sur un disque en rotation.



Un disque horizontal de centre O tourne autour de son axe (Oz) à vitesse angulaire constante $\vec{\omega} = \omega \vec{e}_z$.

Un palet (assimilable à un point matériel de masse m) est posé en un point A du disque, à une distance $OA = d$. On rappelle la force d'inertie centrifuge : $m\omega^2 \vec{OA}$.

a) Quelle est l'orientation de la force centrifuge ?

- (a) $-\vec{e}_\theta$ (b) $\vec{e}_r$ (c) $-\vec{e}_r$ (d) $\vec{e}_\theta$

.....

b) Sans frottement entre le disque et le palet, quel mouvement du palet peut-on prévoir ?

- (a) Le palet se rapproche inexorablement du centre du disque.
(b) Le palet reste immobile dans le référentiel du disque.
(c) Le palet est expulsé radialement du disque.

.....

Il existe une force de frottement telle que le palet reste immobile tant que la norme de la force d'inertie centrifuge est inférieure à μmg .

c) Déterminer l'expression de la valeur limite $\omega_{\max}$ de la vitesse angulaire en deçà de laquelle le palet reste immobile.

.....

d) Calculer $\omega_{\max}$ sachant que $d = 5 \text{ cm}$, $m = 150 \text{ g}$ et $\mu = 0,5$

 Entraînement 2.13 — Anneau sur tige en rotation.



On s'intéresse dans cet entraînement au mouvement d'un anneau de masse m placé sur une tige en rotation à la vitesse angulaire ω . Cet anneau subit aussi une force de rappel exercée par un ressort de raideur k fixé sur l'axe de rotation. L'abscisse x de l'anneau sur la tige satisfait l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{x} + \left(\frac{k}{m} - \omega^2 \right) x = 0.$$

a) Quelle est la dimension du terme $\frac{k}{m}$?

On propose les solutions suivantes pour $x(t)$, dans lesquelles A , Ω , φ et β sont des constantes.

- (a) $x(t) = A \cos(\Omega t + \varphi)$
(b) $x(t) = A \cosh(\Omega t + \varphi)$
(c) $x(t) = A e^{-\beta t} \cos(\Omega t + \varphi)$

b) Quelle est la forme des solutions si $\omega^2 > \frac{k}{m}$?

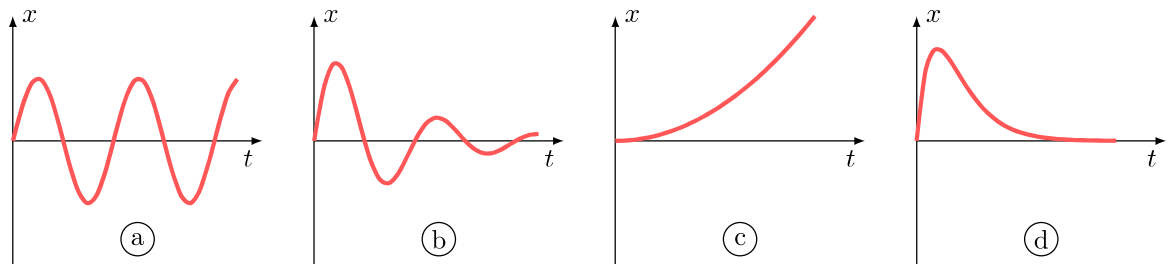
c) Quelle est la forme des solutions si $\omega^2 < \frac{k}{m}$?

d) On pose $\Omega^2 = \frac{k}{m} - \omega^2 > 0$. Expliciter la solution dans le cas où $x(0) = 0$ et $\dot{x}(0) = v_0$.

.....

e) Parmi les trois solutions représentées sur les graphiques ci-dessous, laquelle correspond à la situation de la question b) ?

.....



Réponses mélangées

(c)	$\sqrt{\frac{\mu g}{d}}$	(d)	$\frac{\sqrt{3}m\omega_0^2 \ell \vec{e}_r}{2}$	(b)	(b)	(a)	(d)	T^{-2}	(d)
(c)	(a)	$10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$T \sin(\theta_e) \vec{e}_x + T \cos(\theta_e) \vec{e}_y$		$-ma \vec{e}_x$	$2m\omega_0 v_1 \vec{e}_r$		$\ddot{r} \vec{e}_r$	
(b)	(c)	(d)	(b)	(c)	(c)	$-mg \vec{e}_y$	(c)	$-\omega^2 r \vec{e}_r$	(c)
	$-2m\omega_0 v_1 \vec{e}_\theta$	(b)	$2\omega \dot{r} \vec{e}_\theta$	(b)		$-2m\Omega \dot{z} \cos \lambda \vec{e}_x$	(c)	(a)	$m\omega_0^2 \ell \vec{e}_r$
(b)	$2m\omega_0(v_2 \vec{e}_y - v_1 \vec{e}_z)$	(c)	$\frac{v_0}{\Omega} \sin(\Omega t)$	(b)	(a) et (b)	(b)		27°	(a)
(b)	0,5	(c)	Faux	$\vec{0}$	(a)	Faux	$2m\omega_0 v_1 \vec{e}_x$	Vrai	$3,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

► Réponses et corrigés page 297

Fiche n° 2. Changements de référentiel

Réponses

2.1 a)	(b)	2.5 c)	(d)	2.11 a)	0,5
2.1 b)	(a)	2.5 d)	(c)	2.11 b)	(b)
2.1 c)	(d)	2.5 e)	(c)	2.11 c)	$-mg\vec{e}_y$
2.2 a)	Vrai	2.5 f)	(c)	2.11 d)	$T \sin(\theta_e)\vec{e}_x + T \cos(\theta_e)\vec{e}_y$
2.2 b)	Faux	2.6 a)	$\vec{0}$	2.11 e)	$-ma\vec{e}_x$
2.2 c)	Faux	2.6 b)	$m\omega_0^2\ell\vec{e}_r$	2.11 f)	(d)
2.3 a)	(a)	2.6 c)	$\frac{\sqrt{3}m\omega_0^2\ell\vec{e}_r}{2}$	2.11 g)	(b)
2.3 b)	(b)	2.7	(c)	2.11 h)	27°
2.3 c)	(b)	2.8 a)	$2m\omega_0 v_1 \vec{e}_x$	2.12 a)	(b)
2.3 d)	(b)	2.8 b)	$2m\omega_0(v_2\vec{e}_y - v_1\vec{e}_z)$	2.12 b)	(c)
2.4 a)	(c)	2.8 c)	$-2m\omega_0 v_1 \vec{e}_\theta$	2.12 c)	$\sqrt{\frac{\mu g}{d}}$
2.4 b)	(b)	2.8 d)	$2m\omega_0 v_1 \vec{e}_r$	2.12 d)	$10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
2.4 c)	(a)	2.9 a)	(c)	2.13 a)	T^{-2}
2.4 d)	(d)	2.9 b)	(c)	2.13 b)	(b)
2.4 e)	$-\omega^2 r \vec{e}_r$	2.9 c)	$-2m\Omega \dot{z} \cos \lambda \vec{e}_x$	2.13 c)	(a)
2.4 f)	$2\omega \dot{r} \vec{e}_\theta$	2.10 a)	(c)	2.13 d)	$\frac{v_0}{\Omega} \sin(\Omega t)$
2.4 g)	$\ddot{r} \vec{e}_r$	2.10 b)	(b)	2.13 e)	(c)
2.5 a)	(a)	2.10 c)	$3,8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$		
2.5 b)	(a) et (b)				

Corrigés

2.1 a) Cette trajectoire est appelée *cycloïde*.

2.1 b) Le centre de la roue est immobile dans le référentiel du vélo, et le point V a une trajectoire circulaire autour de l'axe (fixe) de la roue.