Semaine 1

#buffon/colles

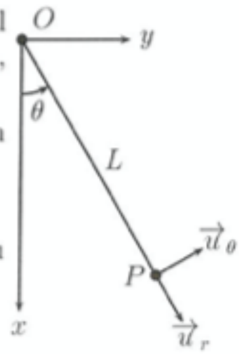
QDC

- Loi de coulomb, énoncé et exemple
- Référentiel en rotation par rapport à un référentiel galiléen
- Référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen

Exo 1 Le pendule pas si simple

Exercice 3

Un pendule simple est formé d'un fil de masse négligeable, sans raideur, inextensible et de longueur L, reliant un point matériel P de masse m et un point d'attache O fixé au plafond. Le mouvement est limité au plan vertical (Oxy). On utilisera les coordonnées cylindriques et la base locale $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$. Le champ de pesanteur est $g\vec{u}_x$ avec $g > 0$.



1) Faire un bilan des forces sur P. Représenter les différentes forces sur un schéma.

2) Appliquer loi de la quantité de mouvement.

3) Donner les expressions des vecteurs position, vitesse et accélération du point P en utilisant les coordonnées cylindriques.

4) Établir l'équation différentielle vérifiée par θ.

5) Que devient l'équation précédente dans la limite des petits angles. Comment s'appelle cette équation différentielle ? Quelle est sa solution générale ?

On suppose désormais que le point P est également soumis à une force de frottement visqueux $\vec{f} = -bm\vec{v}_P$, où $\vec{v}_P$ est la vitesse de P et b est une constante positive.

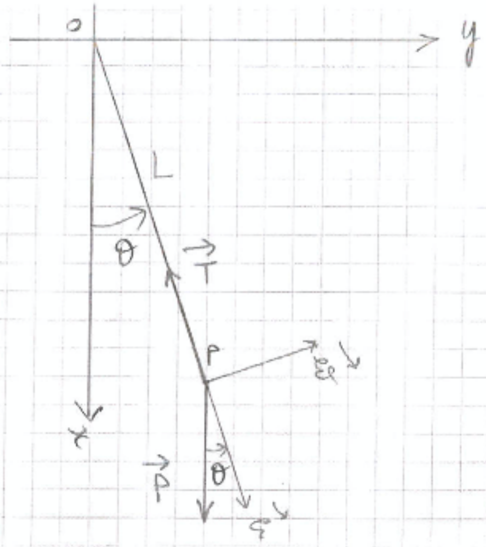
6) Établir la nouvelle équation différentielle vérifiée par θ dans la limite des petits angles ?

7) Quelle valeur L_c faut-il donner à L pour que le régime transitoire soit critique ?

correction

TD 16

Exercice 3 :



1) $\vec{P}$ poids

$\vec{T}$ tension fil

2) $\dfrac{d(m\vec{v})}{dt} = \sum \vec{F_{ext}}$

$= \vec{P} + \vec{T}$

$= m\,\vec{a}(P)$

3) $\vec{OP} = L\,\vec{e_r}$ $\qquad \vec{V}(P) = L\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$ $\qquad \vec{a}(P) = \begin{vmatrix} -L(\dot{\theta})^2 \\ L\ddot{\theta} \end{vmatrix}$

base polaire

4) PFD projeté sur $\vec{e_\theta}$

$$\cancel{m} L\ddot{\theta} = -\cancel{m}g\sin\theta$$

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

5) Aux petits angles, on peut linéariser le sinus

$\sin\theta \simeq \theta$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0$$ éq° canoniq OH parfait.

$$\theta(t) = A\cos(\omega_0 t) + B\sin(\omega_0 t)$$

où $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{g}{L}}$

6) $\vec{f} = -bm\,L\dot{\theta}\,\vec{e_\theta}$

$$mL\ddot{\theta} = -mg\sin\theta - mbL\dot{\theta}$$

Aux petits angles $\quad \ddot{\theta} + b\dot{\theta} + \dfrac{g}{L}\theta = 0$

Exercice 3 suite.

On reconnaît l'équation différentielle canonique d'un OHA

On passe en paramétrage canonique

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0$$

$$\ddot{\theta} + b\,\dot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0$$

Identificat° $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$

$$\frac{\omega_0}{Q} = b \Rightarrow Q = \frac{\omega_0}{b} = \sqrt{\frac{g}{L}}\,\frac{1}{b}$$

On a un régime critique si $Q = \frac{1}{2}$

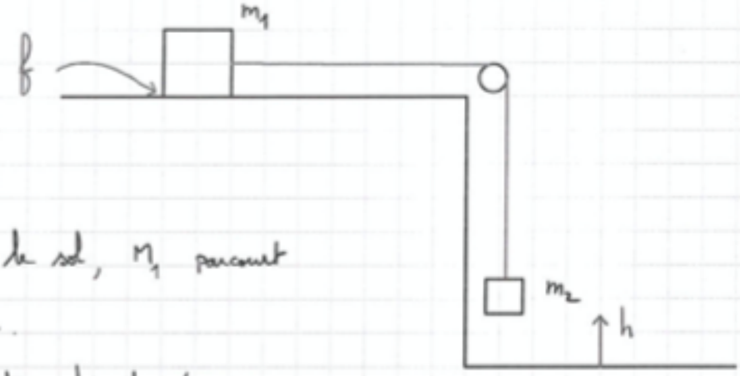
$$\sqrt{\frac{g}{L}}\,\frac{1}{b} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{g}{L}\,\frac{1}{b^2} = \frac{1}{4}$$

$$L_c = \frac{4g}{b^2}$$

Exo 2 Dissipation et TEC

Exercice :



? : $m_2 > m_1$

Quand M_2 touche le sol, M_1 parcourt encore une distance d.

Exprimer f en fonction des données.

correction

TEC appliqué $\{M_1 + M_2\}$ pour la première phase du mouvement

$$\frac{1}{2}(m_1+m_2)v^2 - 0 = W_{\vec{P_2}} + W_{\vec{R_{T_1}}} = +m_2gh - fm_1gh$$

TEC appliqué à $\{M_1\}$ pour la 2e phase

$$0 - \frac{1}{2}m_1v^2 = -fm_1gd \Rightarrow v^2 = 2fgd$$

finalement $\cancel{\frac{1}{2}}(m_1+m_2)\cancel{2}f\cancel{g}d = m_2\cancel{g}h - fm_1\cancel{g}h$

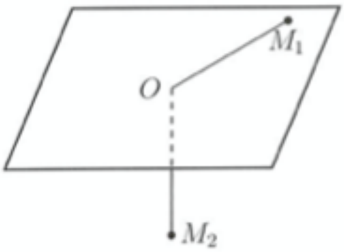
$$f\left((m_1+m_2)d - m_1h\right) = m_2h$$

$$\boxed{f = \frac{m_2h}{(m_1+m_2)d - m_1h}}$$

On peut également établi ce résultat avec plusieurs PFD mais c'est beaucoup plus long.

Exo 3 Le satellite sur une table

I·8



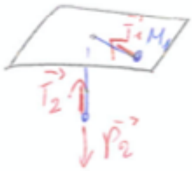
On considère deux points matériels M_1 (masse m_1) et M_2 (masse m_2) accrochés l'un à l'autre par un fil inextensible de longueur L. Le point M_1 se déplace sans frottement sur un plan horizontal. Sur ce plan a été percé un trou en O par lequel passe le fil. Le point M_2 se déplace uniquement verticalement comme l'indique la figure. À l'instant initial $t = 0$, la masse m_2 est immobile et la masse m_1 a une vitesse orthogonale à OM_1.

1) Quelle vitesse initiale faut-il donner à M_1 pour qu'il décrive une trajectoire circulaire de rayon R ?

2) Pour toute autre vitesse initiale, décrire le mouvement de M_1. Calculer en particulier une énergie potentielle effective.

correction

Exercice 8 :



$\downarrow \vec{u_z}$ $\qquad L = r_1 + z_2$

1) Principe f^{al} :

à M_2 : $m_2 \vec{a_2} = \vec{P_2} + \vec{T_2} \Rightarrow m_2 \ddot{z}_2 = m_2 g - T_2$

Si M_2 est immobile : $T_2 = m_2 g$

à M_1 : $m_1(\ddot{r}_1 - r_1 \dot{\theta}_1^2) = -T_1$

sur $\vec{u_r}$ $\qquad$ $\ddot{r}_1$: 0 car cercle

$$m_1 \frac{V_{M_1}^2}{R} = T_1 = m_2 g$$

$$V_{M_1} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1} g R}$$

2) On a $T_2 = m_2 g - m_2 \ddot{z}_2$

$$= m_2 g + m_2 \ddot{r}_1$$

Principe fd sur M_1 : $m_1 \vec{a_1} = \vec{T_1} + \vec{P_1} + \vec{R_1}$

Sur $\vec{u_r}$: $m_1(\ddot{r}_1 - r_1 \dot{\theta}_1^2) = -T_1 = -m_2(g + \ddot{r}_1)$

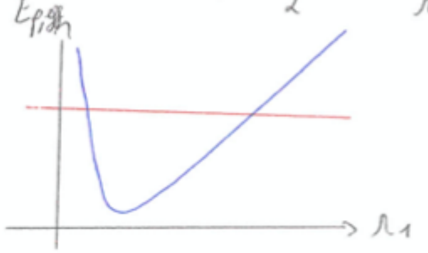
$$m_1\left(\ddot{r}_1 - \frac{C^2}{r_1^3}\right) = -m_2(g + \ddot{r}_1)$$

$$\dot{r}_1\left((m_1+m_2)\ddot{r}_1\right) = \left(m_1 \frac{C^2}{r_1^3} - m_2 g\right)\dot{r}_1$$

on intègre

$$\frac{1}{2}(m_1+m_2)\dot{r}_1^2 + \frac{1}{2} m_1 \frac{C^2}{r_1^2} + m_2 g r_1 = \text{cste}$$

On pose $E_{p,eff} = \frac{1}{2} m_1 \frac{C^2}{r_1^2} + m_2 g r_1$



2e méthode (+) :

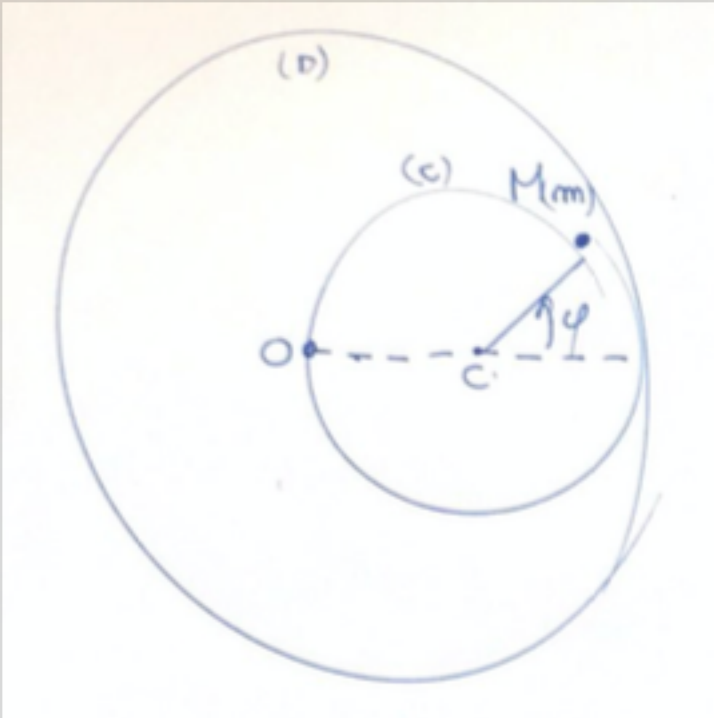
Th de l'énergie mécaniq à $\{M_1, M_2\}$:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 - m_2 g z_2\right) = \mathcal{P}_{\vec{T_1}} + \mathcal{P}_{\vec{T_2}}$$

$$= -T_1 \dot{r}_1 - T_2 \dot{z}_2 = 0$$

Rq $T_1 = T_2$ car on a négligé les frottements entre le fil et le support, et, la masse du fil

Exo 4 La routourne tournera



Le disque (D) tourne autour de l'axe vertical Oz à la vitesse angulaire constante ω.
Le point matériel M de masse m est assujetti à se déplacer sans frottement sur la circonférence (C) liée à (D).
Établir l'équation du mouvement de M par deux méthodes différentes. Trouver les positions d'équilibre et étudier leur stabilité.

$OC = R$, $OA = 2R$

correction

I - 21 :

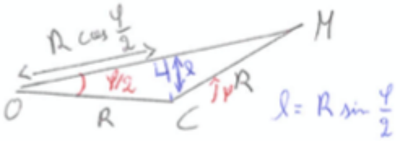
1re méthode : TMC /r à $\underset{''}{\overset{\Delta}{(Cz)}}$ dans le ref lié à (D) en rotation uniforme /r à (Oz) fixe dans R galiléen :

$$\frac{dL_\Delta}{dt} = \underset{=0}{\mathcal{M}_\Delta(\vec{P})} + \underset{=0}{\mathcal{M}_\Delta(\vec{T})} + \mathcal{M}_\Delta(\vec{f_{ie}}) + \underset{=0}{\mathcal{M}_\Delta(\vec{f_{ic}})}$$

$$\cancel{m} R^{\cancel{2}} \ddot{\varphi} = \pm \cancel{R} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cancel{m}\, \omega^2 2R \cos\frac{\varphi}{2}$$

$$\ddot{\varphi} = \pm \omega^2 \sin\varphi$$

Position d'éq : $\varphi = 0$ stable
$\varphi = \pi$ instable



2e méthode : Méthode énergétique

Dans R' non galiléen : $\vec{P}$, $\vec{f_{ic}}$, $\vec{R}$ ne travaillent pas
$\vec{f_{ie}}$ qui dérive de $E_p = -\frac{m}{2}\omega^2 OM^2$

$$E_M = \frac{1}{2}\cancel{m}(\cancel{R}\dot{\varphi})^2 - \frac{1}{2}\cancel{m}\,\omega^2\left(4\cancel{R}^2\cos^2\frac{\varphi}{2}\right) = \text{cste}$$

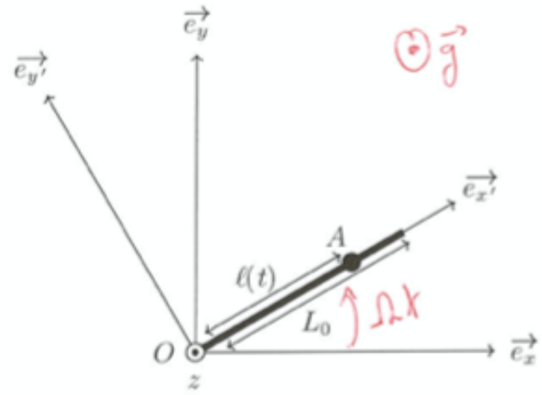
$$\cancel{\dot{\varphi}}\ddot{\varphi} + 2\times\cancel{2}\times\cancel{\frac{1}{2}}\,\omega^2\cancel{\dot{\varphi}}\sin\frac{\varphi}{2}\cos\frac{\varphi}{2} = 0$$

$$\ddot{\varphi} + \omega^2\sin\varphi = 0$$

Stabilité :
- $\varphi = 0 + \varepsilon \rightarrow \ddot{\varepsilon} + \omega^2\varepsilon = 0$ OH donc stable
- $\varphi = \pi + \varepsilon \rightarrow \ddot{\varepsilon} - \omega^2\varepsilon = 0$ instable

Exo 5 Le pistolet imprécis

I · 20



Dans le référentiel terrestre, une barre horizontale tourne autour de l'axe vertical (Oz), O étant l'intersection de la barre et de l'axe. La vitesse de rotation de la barre Ω est supposée constante. L'angle $(\overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_{x'}})$ vaut Ωt. Soit $\mathcal{R} = (O, \overrightarrow{e_x}, \overrightarrow{e_y}, \overrightarrow{e_z})$ un repère lié au référentiel terrestre. Le vecteur $\overrightarrow{e_{x'}}$ est dirigé selon la barre. Le vecteur $\overrightarrow{e_{y'}}$ est tel que la base $(\overrightarrow{e_{x'}}, \overrightarrow{e_{y'}}, \overrightarrow{e_z})$ soit directe. Un anneau A de masse m coulisse sans frottement le long de la barre. La longueur de la barre est notée L_0. On note $\ell = OA$. À l'instant initial $t = 0$, $\ell(0) = \dfrac{L_0}{2}$ et $\dfrac{d\ell}{dt}(0) = 0$. L'accélération de la pesanteur sera notée g.

1) Déterminer l'expression de $\ell(t)$.

2) À l'instant $t = T$, l'anneau quitte la barre. Quelle est l'équation vérifiée par T ?

3) Soient $R_{y'} = \vec{R} \cdot \overrightarrow{e_{y'}}$ et $R_z = \vec{R} \cdot \overrightarrow{e_z}$ les coordonnées de la réaction de la barre. Exprimer R_z et $R_{y'}$.

correction

Ex 20 :

1) Principe fal ds R' projeté sur $\vec{e_{x'}}$:

$$m\ddot{l} = m l \Omega^2 - 2m(\Omega \vec{e_{z'}} \wedge \dot{l}\vec{e_{x'}}) \cdot \vec{e_{x'}} + \vec{P} \cdot \vec{e_{x'}} + \vec{R} \cdot \vec{e_{x'}}$$

$$= m l \Omega^2$$

$$\ddot{l} - \Omega^2 l = 0$$

$$P(X) = (X+\Omega)(X-\Omega)$$

$$l = Ae^{-\Omega t} + Be^{\Omega t}$$

$$CI : \begin{cases} A+B = \frac{L_0}{2} \\ B-A = 0 \end{cases} \Rightarrow A = B = \frac{L_0}{4}$$

$$l = \frac{L_0}{4}\left(e^{-\Omega t} + e^{\Omega t}\right) = \frac{L_0}{2}\cos(\Omega t)$$

2) On a $\cos(\Omega T) = 2$

3) Principe fal projeté sur z' :

$$0 = mg + R_z + \vec{f_{ie}} \cdot \vec{e_z} + \vec{f_{ic}} \cdot \vec{e_z}$$

Donc $R_z = mg$

Principe fal sur $\vec{y'}$:

$$0 = \vec{f_{ie}} \cdot \vec{e_{y'}} - 2m\Omega + \vec{P} \cdot \vec{e_{y'}} + R_{y'}$$

$$0 = -2m\Omega\dot{l} + R_{y'}$$

$$R_{y'} = 2m\Omega\dot{l} = 2m\Omega^2 sh(\Omega t)\frac{L_0}{2}$$

$$R_{y'} = L_0 m \Omega^2 sh(\Omega t)$$

Exo 6 Pendule de Foucault

I · 25 Pendule de Foucault

Un pendule simple de longueur L est attaché à un point fixe du référentiel terrestre en rotation autour de l'axe des pôles à la vitesse angulaire Ω par rapport au référentiel géocentrique supposé galiléen. Le lieu de l'expérience est à la latitude λ.

1) Établir les équations du mouvement du pendule dans l'approximation harmonique (petites oscillations à deux dimensions) mais en tenant compte de la force d'inertie de Coriolis : Ox sera choisi horizontal vers l'est, Oy vers le nord, Oz vertical ascendant. On négligera les dérivées de la côte z.

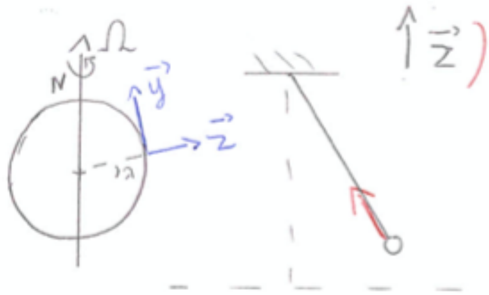
2) Résoudre le système en posant $\xi = x + iy$ et déterminer $\xi(t)$ en supposant $\Omega \ll \omega_0$ (ω_0 pulsation propre du pendule).

3) En se plaçant dans le repère tournant autour de Oz à la vitesse angulaire $\omega_e = -\Omega\sin(\lambda)$ décrire le mouvement dans ce repère puis dans le repère terrestre $Oxyz$.

Conditions initiales : $x(0) = a$, $y(0) = 0$ et $\dot{x}(0) = \dot{y}(0) = 0$.

correction

I - 25 :



$\uparrow \vec{z}$) verticale (prend compte de $\vec{f}_{ie}$)

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{T} - 2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

$$M_4 : \vec{T} = -T\,\frac{\vec{OM}}{L} \underbrace{\simeq}_{\text{PFD sur } \vec{u_z}} -mg\,\frac{\vec{OM}}{L}$$

1) Principe f^al ds $R_{géocentriq}$ supposé galiléen :

$$m\begin{vmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{y}\\ \underbrace{\ddot{z}}_{=0}\end{vmatrix} = mg\begin{vmatrix}0\\0\\-1\end{vmatrix} - \frac{T}{L}\begin{vmatrix}x\\y\\ \underbrace{z}_{\simeq -L}\end{vmatrix} - 2m\Omega\,\underbrace{\begin{vmatrix}0\\ \cos\lambda\\ \sin\lambda\end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \underbrace{\dot{z}}_{=0}\end{vmatrix}}_{=\begin{vmatrix}-\sin\lambda\,\dot{y}\\ \sin\lambda\,\dot{x}\\ -\cos\lambda\,\dot{x}\end{vmatrix}} \quad (*)$$

Sur $\vec{u_z}$: $0 = -mg + T + 2m\Omega\cos\lambda\,\dot{x}$

$T = m(g - 2\Omega\cos\lambda\,\dot{x})$ AN : $\begin{cases} g \simeq 10\ m.s^{-2} \\ \dot{x} \simeq 1\ m.s^{-1} \\ \cos\lambda \simeq 1 \\ \Omega \simeq \frac{2\pi}{24 \times 3600} = 10^{-4}\ s^{-1}\end{cases}$ $\Rightarrow g \gg 2\Omega\cos\lambda\,\dot{x}$

$T \simeq mg$

$(*)$: $\left[\ \begin{vmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{y}\end{vmatrix} = -\frac{g}{L}\begin{vmatrix}x\\y\end{vmatrix} - 2\Omega\sin\lambda\begin{vmatrix}-\dot{y}\\ \dot{x}\end{vmatrix}\right.$

2) On pose $\xi = x + iy$

$$\ddot{\xi} = -\underbrace{\frac{g}{L}}_{=\omega_0^2}\xi - 2i\Omega\sin\lambda\,\dot{\xi}$$

Ordre 1 en $\frac{\Omega}{\omega_0}$

$P(X) = X^2 + 2i\Omega\sin\lambda X + \omega_0^2$

ordre 2 en $\frac{\Omega}{\omega_0}$

$\Delta = -4\Omega^2\sin^2\lambda - 4\omega_0^2 < 0$. On a $\Delta \simeq (2i\omega_0)^2$ (car $\omega_0 >> \Omega$)

Donc solutions : $\begin{cases} \alpha_1 \simeq i(-\Omega\sin\lambda - \omega_0) \\ \alpha_2 \simeq i(-\Omega\sin\lambda + \omega_0) \end{cases}$

$\xi = Ae^{\alpha_1 t} + Be^{\alpha_2 t}$

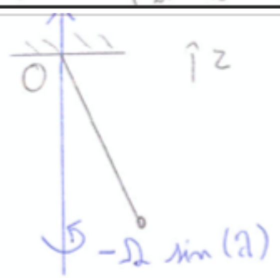
CI : $x(0) = a$, $y(0) = 0$ $\Rightarrow A + B = a$

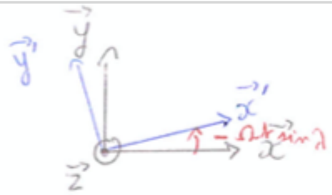
$\dot{x}(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$ $\Rightarrow A - B = -a\frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda$

$$\boxed{\xi = \frac{a}{2}\left(1 - \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{\alpha_1 t} + \frac{a}{2}\left(1 + \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{\alpha_2 t}}$$

$$\xi = e^{-i\Omega\sin\lambda t}\left(\frac{a}{2}\left(1 - \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{-i\omega_0 t} + \frac{a}{2}\left(1 + \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{i\omega_0 t}\right)$$

3)





$$x' = \cos(\pm\Omega\sin\lambda t)x + \sin(-\Omega\sin\lambda t)y$$

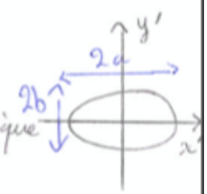
$$y' = \cos(\pm\Omega\sin\lambda t)y - \sin(-\Omega\sin\lambda t)x$$

$$\xi' = \xi e^{+i\Omega\sin\lambda t}$$

$$\xi' = \frac{a}{2}\left(1 - \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{-i\omega_0 t} + \frac{a}{2}\left(1 + \frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\right)e^{i\omega_0 t}$$

$$\xi' = a\cos(\omega_0 t) + i\left(a\frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\sin(\omega_0 t)\right)$$

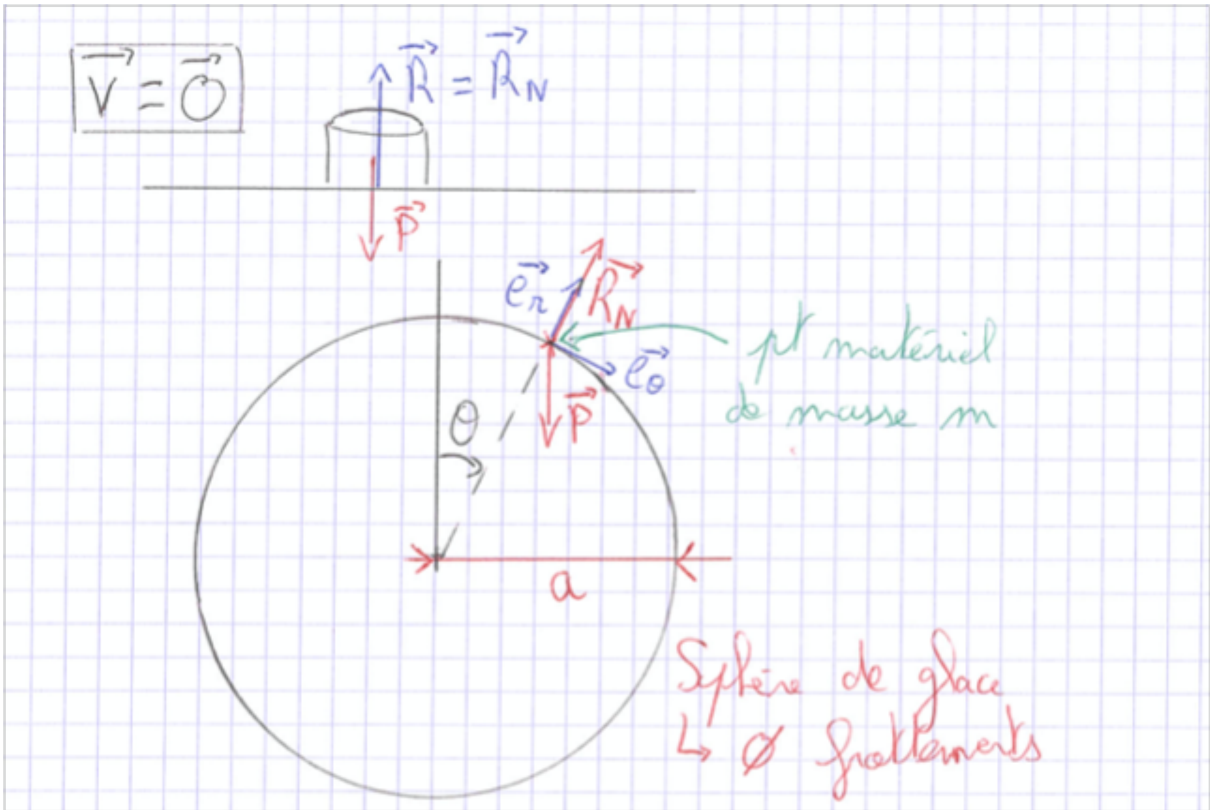
D'où $\begin{cases} x' = a\cos(\omega_0 t) \\ y' = a\frac{\Omega}{\omega_0}\sin\lambda\sin(\omega_0 t) \end{cases}$ Le mouvement est elliptique avec $b << a$



Dans $Oxyz$, le mouvement est comparable à une ellipse qui tourne lentement.

Exo 7 Le pingouin sur une sphère de glace

Un pingouin se trouve sur une boule de glace (on néglige tous les frottements)



On se donne les conditions initiales suivantes :

$$\begin{cases} \theta(t=0) = 0^+ \\ \dot{\theta}(t=0) = 0 \end{cases}$$

Correction :

Réf : labo supposé ga

Syst : {M}

BdF : $\vec{P} = m\vec{g}$ $\quad \vec{R} = \vec{R_N}$

PFD : $\begin{cases} \boxed{m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R_N}} \\ \text{base adaptée = base polaire} \end{cases}$

$$\vec{a}(M) = \begin{vmatrix} \ddot{r} - r(\dot{\theta})^2 \\ 2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} \end{vmatrix} \underset{r = a = cste}{=} \begin{vmatrix} -a(\dot{\theta})^2 \\ a\ddot{\theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{V^2}{a} \\ a\ddot{\theta} \end{vmatrix}$$

$$\vec{P} = m\vec{g} = mg \begin{vmatrix} -\cos\theta \\ \sin\theta \end{vmatrix} \qquad \vec{R_N} = R_N \begin{vmatrix} +1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Donc $\boxed{-m\,a(\dot{\theta})^2 = -mg\cos\theta + R_N}$ (1)

$\boxed{a\ddot{\theta} = g\sin\theta}$ (2)

On fait (2) $\times \dot{\theta}$ et on $\int_{\theta=0}^{\theta}$

$$\int_{\theta=0}^{\theta} a\ddot{\theta}\dot{\theta}\,dt = \int_{\theta=0}^{\theta} g\dot{\theta}\sin\theta\,dt$$

$$\left[\frac{a(\dot{\theta})^2}{2}\right]_0^{\theta} = \left[-g\cos\theta\right]_0^{\theta}$$

7) $\frac{a\dot{\theta}^2}{2} - 0 = g(1-\cos\theta)$

$$\boxed{\frac{d(\dot{\theta})^2}{2} = g(1-\cos\theta)} \qquad (2')$$

Rque : homog ✓
signe ✓
cohérence $\theta = 0$ ✓

$$\left\{\begin{matrix}(1)\\(2')\end{matrix}\right. \text{ donnent } -2mg(1-\cos\theta) = -mg\cos\theta + R_N$$

$$\boxed{R_N = mg(3\cos\theta - 2) = \|\vec{R_N}\|}$$

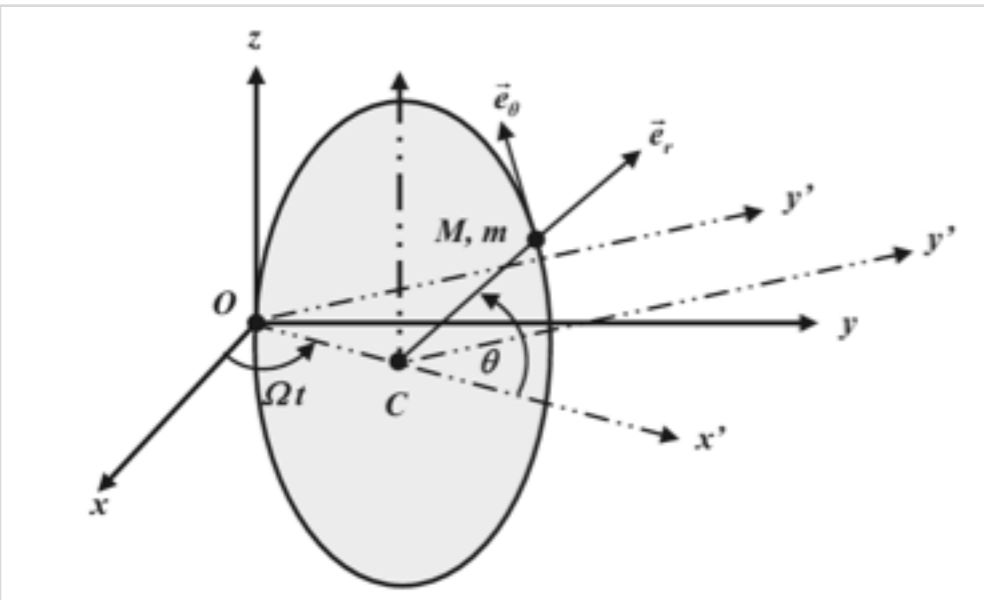
$R_N \propto \cos\theta$, $R_N \searrow$ de θ ds $[0, \frac{\pi}{2}]$

Décollage dès que $R_N(\theta_d) = 0$

$\Rightarrow 3\cos\theta_d = 2$

$$\boxed{\cos\theta_d = \frac{2}{3}}$$

Exo 8 Ça tourne (bis)



Un anneau de masse m glisse, sans frottements, sur un cerceau de rayon R, lié au référentiel tournant $\mathcal{R}' = (O, x', y', z')$.

Le référentiel $\mathcal{R}'$ tourne autour de l'axe Oz avec une vitesse angulaire Ω constante.

Les calculs seront menés dans la base de projection $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, -\vec{e}_{y'})$.

1) Effectuer le bilan des forces s'exerçant sur l'anneau dans le référentiel $\mathcal{R}'$.

2) En déduire que θ vérifie une équation du type :

$$R\ddot{\theta} = f(\theta),$$

où $f(\theta)$ est une fonction de θ à déterminer.

3) Trouver une condition sur la vitesse angulaire Ω pour que $\theta = \theta_e$ soit une position d'équilibre. Cette position est-elle stable ou instable ?

correction

1) et 2)
On se place dans le référentiel tournant non galiléen

PFD $\cdot \vec{e}_\theta$: $mR\ddot{\theta} = \left(\sum \vec{F}\right)\cdot\vec{e}_\theta$

$$= \left(\vec{P} + \vec{R}_c + \vec{F}_{ie} + \vec{F}_{ic}\right)\cdot\vec{e}_\theta$$

Donc, $mR\ddot{\theta} = -mg\cos\theta + 0 - m\Omega^2 R(1+\cos\theta)\sin\theta$

Puis, $R\ddot{\theta} = -g\cos\theta - \Omega^2 R(1+\cos\theta)\sin\theta$

Ainsi, $R\ddot{\theta} = f(\theta)$ avec $f(\theta) = -g\cos\theta - \Omega^2 R(1+\cos\theta)\sin\theta$

3) Equilibre si $\theta = $ cst

$\ddot{\theta} = 0$

Donc $\boxed{f(\theta_e) = 0}$

Puis discuter de la stabilité...