Corrigé TD1

I Principe d'inertie

1) – Principe d'inertie : → 3 critères à mentionner.

On postule l'existence d'un ensemble de référentiels R_g (1), dits galiléens ou d'inertie, en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres, dans lesquels une particule matérielle mécaniquement isolée (2) (c'est-à-dire soumis à aucune force) est en translation rectiligne uniforme. (3)
Une particule au repos reste au repos.

– Les référentiels galiléens sont en translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres.

– Référentiel de Copernic :
- origine : centre de masse du système solaire (⚠ ce n'est pas le centre de masse du Soleil).
- ses axes sont définis par la direction de trois étoiles ("supposées fixes")

→ Il forme la meilleure approximation de référentiel galiléen.

Référentiel géocentrique :
- origine : centre de masse de la Terre.
- ses axes sont définis par la direction de trois étoiles "fixes"

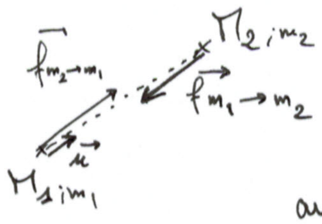
→ Il forme une bonne approximation de référentiel galiléen pour des expériences "courtes" devant la période de rotation de la Terre autour du Soleil.

Référentiel terrestre :
- origine : un point quelconque de la Terre.
- ses axes sont définis localement, et sont liés à la rotation de la Terre.

→ Il forme une bonne approximation de référentiel galiléen pour des expériences "courtes" devant la période de rotation de la Terre sur elle même.

2) Exemples de forces :

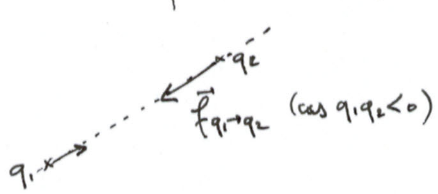
– force gravitationnelle : 2 masses m_1 et m_2, situées en M_1 et M_2 ; la masse m_1 exerce la force $\vec{f}_{m_1\to m_2}$ sur la masse m_2 selon :



$$\boxed{\vec{f}_{m_1\to m_2} = -\mathcal{G}\frac{m_1 m_2}{r^2}\vec{u} = -\mathcal{G}\frac{m_1 m_2}{r^2}\frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{\|\overrightarrow{M_1M_2}\|^3}},$$

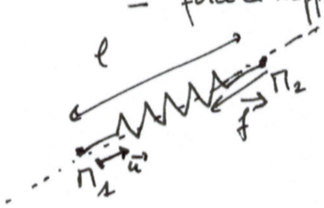
avec $\vec{u} = \overrightarrow{M_1M_2}$, $r = \|\overrightarrow{M_1M_2}\|$ et $\mathcal{G} = 6{,}672\cdot10^{-11}\ N\cdot m^2\cdot kg^{-2}$ la constante de gravitation universelle

– force électrostatique de Coulomb : 2 charges ponctuelles q_1 et q_2 ; la force $\vec{f}_{q_1\to q_2}$ exercée par la charge q_1 sur q_2 est :



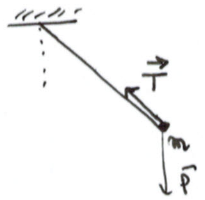
$$\boxed{\vec{f}_{q_1\to q_2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}\vec{u} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{\|\overrightarrow{M_1M_2}\|^3}\overrightarrow{M_1M_2}}$$

– force de rappel d'un ressort : soit un ressort de masse négligeable, de longueur au repos l_0, de direction d'allongement $\vec{u}$.
La force de rappel élastique $\vec{f}_{el}$ exercée sur le point M_2 est :



$$\boxed{\vec{f} = -k(l-l_0)\vec{u}}.$$

- Tension d'un fil : La tension $\vec{T}$ d'un fil est dirigée selon la direction définie par ce fil, tant que le fil est tendu.



Sa valeur est arbitraire, dans la limite où le fil ne casse pas.

- Dans le système d'unités international, l'unité de force est le Newton (symbole N).

[Sa définition est la suivante : un newton est la force capable de communiquer à une masse de 1 kg une accélération de 1 m/s^2.].

- Principe fondamental de la dynamique :

Pour un système fermé dans un référentiel galiléen R_g, on a

$$\boxed{\left(\frac{d\vec{p}_{R_g}}{dt}\right)_{R_g} = \vec{F}_{ext}},$$

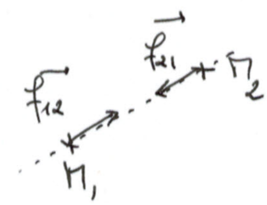
où $\vec{F}_{ext}$ est l'ensemble des forces extérieures et $\vec{p}_{R_g} = m\vec{v}_{R_g}$ est la quantité de mouvement dans R_g.

Rq : Les forces intérieures n'intervenant pas, la définition du système devient fondamentale.

3) Principe des actions réciproques :

Soit deux points matériels M_1 et M_2, dont les forces d'interactions sont respectivement notées $\vec{f}_{12}$ (force exercée par 2 sur 1) et $\vec{f}_{21}$.

Le principe des actions réciproques stipule que l'on a $\boxed{\vec{f}_{12} = -\vec{f}_{21}}$, et que les forces $\vec{f}_{12}$ et $\vec{f}_{21}$ sont portées par la droite passant par M_1M_2.

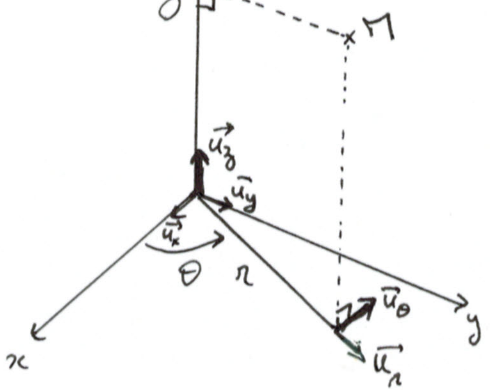


II) Cinématique

- En coordonnées cartésiennes : $\vec{OM} = x\vec{u_x} + y\vec{u_y} + z\vec{u_z} = \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix}$ (repère $(O; \vec{u_x}; \vec{u_y}; \vec{u_z})$)

Alors $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \begin{vmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{vmatrix}$ et $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \begin{vmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{vmatrix}$

- En coordonnées cylindriques : $\vec{OM} = r\vec{u_r} + z\vec{u_z}$. (repère $(O; \vec{u_r}; \vec{u_\theta}; \vec{u_z})$).



Alors $\vec{v} = \frac{d\vec{OM}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(r\vec{u_r} + z\vec{u_z}\right)$.

Mais comme $(\vec{u_r}; \vec{u_\theta})$ est lié au point courant M, on a implicitement une dépendance en temps des vecteurs de base $\vec{u_r}$ et $\vec{u_\theta}$.

d'où $\vec{V} = \dot{r}\vec{u_r} + r\frac{d\vec{u_r}}{dt} + \dot{z}\vec{u_z}$.

A SAVOIR, EN POLAIRE, $\frac{d\vec{u_r}}{dt} = \dot{\theta}\vec{u_\theta}$ et $\frac{d\vec{u_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\vec{u_r}$.

et donc $\boxed{\vec{v} = \dot{r}\,\vec{u_r} + r\dot{\theta}\,\vec{u_\theta} + \dot{z}\,\vec{u_z}}$.

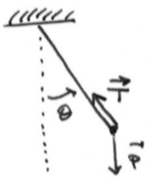
De même, pour l'accélération :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{r}\vec{u_r} + r\dot{\theta}\vec{u_\theta} + \dot{z}\vec{u_z}\right) = \ddot{r}\,\vec{u_r} + \dot{r}\dot{\theta}\,\vec{u_\theta} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{u_\theta} + r\ddot{\theta}\,\vec{u_\theta} - r\dot{\theta}^2\vec{u_r} + \ddot{z}\,\vec{u_z}$$

soit $$\boxed{\vec{a} = \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right)\vec{u_r} + \left(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}\right)\vec{u_\theta} + \ddot{z}\,\vec{u_z}}.$$

En sphérique, le calcul général est très complexe : on procède en pratique au cas par cas en exploitant les symétries du problème.

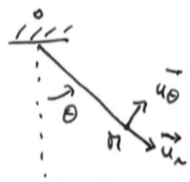
III) Le pendule simple



$\vec{T}$: tension du fil
$\vec{P}$: poids du fil.

R : référentiel du laboratoire, supposé galiléen.

Système de coordonnées adapté : polaire (base locale $(\vec{u_r}\,;\vec{u_\theta})$).



Alors $\vec{OM} = r\vec{u_r} = l\vec{u_r}$.

Le fil est inextensible donc $l = C^{ste}$.

$$\vec{v} = \left(\frac{d\vec{OM}}{dt}\right)_R = l\frac{d\vec{u_r}}{dt} = l\dot{\theta}\vec{u_\theta} \Rightarrow \boxed{\vec{v} = l\dot{\theta}\vec{u_\theta}}$$

Ensuite, $\vec{a} = \left(\frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}\right)_R = \left(\frac{d\vec{v}}{dt}\right)_R = \frac{d}{dt}\left(l\dot{\theta}\vec{u_\theta}\right) = l\ddot{\theta}\vec{u_\theta} + l\dot{\theta}(-\dot{\theta})\vec{u_r}$

soit $\boxed{\vec{a} = -l\dot{\theta}^2\vec{u_r} + l\ddot{\theta}\vec{u_\theta}}$

IV) Extrait AgregB 2006 : Astronefs et aéronefs

A) 1.1.a.

- Un référentiel R lié à un solide $\mathcal{S}$ de référence, est la donnée d'un point solidaire de $\mathcal{S}$ ainsi que 3 directions définissant un système d'axes solidaires du solide, et est muni d'une horloge.

- Soit O l'origine d'un repère associé à R. On a alors, par définition,

$$\boxed{\vec{v}_R(M) = \left(\frac{d\vec{OM}}{dt}\right)_R} \quad \text{et} \quad \boxed{\vec{a}_R(M) = \left(\frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}\right)_R}$$

Rq : pour une dérivée temporelle, il faut toujours préciser par rapport à quel référentiel on dérive.

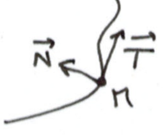
- En coordonnées cartésiennes :

$\vec{OM} = x\vec{u_x} + y\vec{u_y} + z\vec{u_z}$; $\vec{v}_R = \dot{x}\vec{u_x} + \dot{y}\vec{u_y} + \dot{z}\vec{u_z}$; $\vec{a}_R = \ddot{x}\vec{u_x} + \ddot{y}\vec{u_y} + \ddot{z}\vec{u_z}$

En coordonnées cylindriques :

$\vec{OM} = r\vec{u_r} + z\vec{u_z}$; $\vec{v}_R = \dot{r}\vec{u_r} + r\dot{\theta}\vec{u_\theta} + \dot{z}\vec{u_z}$; $\vec{a}_R = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\vec{u_r} + 2\dot{r}\dot{\theta}\vec{u_\theta} + \ddot{z}\vec{u_z}$

Base de Frenet



$\vec{T}$: vecteur tangent à la trajectoire

$\vec{N}$: vecteur normal à la trajectoire, dirigé vers le centre de courbure.

$$\begin{cases} \vec{v} = v\vec{T} \\ \vec{a} = \dot{v}\vec{T} + \dfrac{v^2}{R}\vec{N} \end{cases}$$

où R est le rayon de courbure de la trajectoire.

1.1.c Loi de composition des vitesses : $\boxed{\vec{v}_R = \vec{v}_{R'} + \vec{v}_{(R'/R)}}$ toujours vrai.

avec $\vec{v}_R$ vitesse du point M dans le référentiel R

$\vec{v}_{R'}$ vitesse du point M dans le référentiel R'

et $\vec{v}_{(R'/R)}$ est la vitesse de R' par rapport à R (vitesse d'entraînement).

Loi de composition des accélérations : $\boxed{\vec{a}_R = \vec{a}_{R'} + \vec{a}_e(R'/R) + \vec{a}_c(R'/R)}$

$\vec{a}_e$ accélération d'entraînement de R' par rapport à R = accélération du point coïncident immobile dans R'

$\vec{a}_c$ accélération de Coriolis $\left(\vec{a}_c(R'/R) = 2\,\underbrace{\vec{\Omega}_e}_{\text{vecteur rotation d'entraînement } \vec{\Omega}_e = \vec{\Omega}(R'/R)} \wedge \underbrace{\vec{v}_{R'}}_{\text{vitesse relative (ie dans } R')}\right)$

Cas d'une translation : $\boxed{\vec{a}_R = \vec{a}_{R'}}$ $\qquad \vec{v}_R = \vec{v}_{R'} + \underbrace{\vec{v}_{(R'/R)}}_{\text{vitesse de translation de } R'/R}$.

Cas d'une rotation à vitesse angulaire ω autour d'un axe fixe dans R :

On prend un point $O \in \Delta$ axe de rotation fixe comme origine de repère ; $\vec{\omega}$ vecteur rotation instantanée.

Soit M un point fixe dans R' (sous-entendu le point coïncident).

Soit H son projeté orthogonal sur Δ.

On a $\vec{OM} = \vec{OH} + \vec{HM}$, alors $\boxed{\vec{v}(M) = \vec{\omega} \wedge \vec{OM}}$

Rappel : pour un solide S en rotation à $\vec{\omega}$, les champs de vitesse en O et M sont reliés par la relation suivante :

$$\boxed{\vec{v}(M) = \vec{v}(O) + \vec{\omega} \wedge \vec{OM}}.$$

Dans le cas considéré, $\vec{v}(M) = \vec{\omega} \wedge \vec{HM}$ car $H \in \Delta$ donc est immobile (car Δ fixe dans R).

Accélération du point coïncident $\quad \vec{a}_e(M) = \left.\dfrac{d\vec{v}(M)}{dt}\right)_R$ pour M fixe dans R'.

$$\vec{a}_e(M) = \frac{d}{dt}\left(\vec{\omega} \wedge \vec{HM}\right) = \dot{\vec{\omega}} \wedge \vec{HM} + \vec{\omega} \wedge \left.\frac{d}{dt}(\vec{HM})\right)_R$$

Or, par définition du vecteur instantané de rotation pour un solide indéformable S :

$$\forall (A;B) \in S, \quad \left(\frac{d\vec{AB}}{dt}\right)_R = \vec{\omega} \wedge \vec{AB}$$ où $\vec{\omega}$ est le vecteur instantané de rotation.

d'où $\vec{a}_e(M) = \dot{\vec{\omega}} \wedge \vec{HM} + \vec{\omega} \wedge \left(\vec{\omega} \wedge \vec{HM}\right)$

De plus : $\forall (\vec{a};\vec{b};\vec{c}) \in (\mathbb{R}^3)^3$, on a la relation suivante : $\vec{a} \wedge (\vec{b} \wedge \vec{c}) = (\vec{a}\cdot\vec{c})\vec{b} - (\vec{a}\cdot\vec{b})\vec{c}$

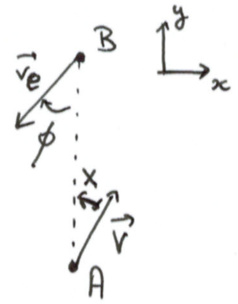
donc $\vec{a}_e(M) = \dot{\vec{\omega}} \wedge \vec{HM} + \underbrace{(\vec{\omega}\cdot\vec{HM})}_{=0 \text{ car H projeté orthogonal}}\vec{\omega} - \omega^2 \vec{HM} = \dot{\vec{\omega}} \wedge \vec{HM} - \omega^2 \vec{HM}$

Donc dans le cas général $\boxed{\vec{a}_e(M) = \dot{\vec{\omega}} \wedge \overrightarrow{HM} - \omega^2 \overrightarrow{HM}}$

Cas important : $\vec{\omega} = \overrightarrow{Cte}$ (rotation constante) $\boxed{\vec{a}_e(M) = -\omega^2 \overrightarrow{HM}}$ (Intervient dans les forces dites centrifuges...)

Et enfin, par définition, $\boxed{\vec{a}_c(M) = 2\vec{\omega} \wedge \vec{v}(M/R')}$

1.1.d.



① Soit R le référentiel lié au sol, et R' le référentiel "lié au vent". Le vent se déplace à la vitesse $\vec{v_e}$ dans R, c'est-à-dire que R' est en translation à la vitesse $\vec{v_e}$ dans R. L'avion se déplace à la vitesse $\vec{V}$ dans R'. Soit $\vec{V_R}$ la vitesse de l'avion dans R.

Loi de composition des vitesses : $\vec{V_R} = \vec{V}_{R'} + \vec{v_e} = \vec{V} + \vec{v_e}$.

Définissons la base cartésienne $(\vec{u_x};\vec{u_y})$, voir schéma :

$$\vec{V_R} = \left| \begin{array}{l} -v_e \sin\phi + V\sin\chi \\ -v_e\cos\phi + V\cos\chi \end{array} \right.$$

L'avion se déplacera en ligne droite si $\vec{V_R}\cdot\vec{u_x} = 0$ d'où la condition $\boxed{v_e \sin\phi = V\sin\chi}$

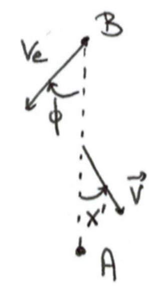
On a donc $\chi = \mathrm{Arcsin}\left(\frac{v_e}{V}\sin\phi\right)$. A.N. : $\chi = 2{,}5°$ ($\simeq 0{,}043$ rad).

② Dans le référentiel R, la trajectoire est une ligne droite à la vitesse $\vec{V_R}$ portée par $\vec{u_y}$.

Sans vent : $t^{(0)}_{A\text{-}B} = \dfrac{2AB}{V}$ pour faire un aller-retour.

Avec le vent : 1ère phase : Aller de A vers B : $\vec{V_R} = (V\cos\chi - v_e\cos\phi)\,\vec{u_y}$.

donc $t_{A\to B} = \dfrac{AB}{V\cos\chi - v_e\cos\phi}$.



2ème phase : Retour de B vers A : nouvel angle χ'

En appliquant le même raisonnement que précédemment :

$$\vec{V}'_R = \left| \begin{array}{l} -v_e \sin\phi + V\sin\chi' \\ -v_e\cos\phi - V\cos\chi' \end{array} \right.$$

La condition de déplacement en ligne droite devient alors $+v_e\sin\phi = V\sin\chi'$ soit $\boxed{\chi' = \chi}$ (avec les conventions de signe choisies).

Alors $\vec{V}'_R = -(v_e\cos\phi + V\cos\chi)\,\vec{u_y}$ et $t_{B\to A} = \dfrac{AB}{v_e\cos\phi + V\cos\chi}$, d'où t_{AB} le temps pour effectuer l'aller-retour :

$$t_{A\text{-}B} = AB\left(\frac{1}{V\cos\chi - v_e\cos\phi} + \frac{1}{V\cos\chi + v_e\cos\phi}\right) = 2AB\,\frac{V\cos\chi}{V^2\cos^2\chi - v_e^2\cos^2\phi}$$

$$t_{A\text{-}B} = \frac{2AB}{V}\,\frac{V^2\cos\chi}{V^2\cos^2\chi - v_e^2\cos^2\phi}$$

A.N. : Sans vent : $t^{(0)}_{AB} = 2{,}247$ h = 2 heures, 14 minutes et 49 secondes

Avec du vent : $t_{AB} = 2{,}281$ h = 2 heures, 16 minutes et 52 secondes.

Montrons que $t_{A-B} \geqslant t_{A-B}^{(0)}$:

$$t_{A-B} - t_{A-B}^{(0)} = \frac{2AB}{V}\left(\frac{V^2\cos X}{V^2\cos^2 X - v_e^2\cos^2\phi} - 1\right)$$

Or $\sin X = \frac{v_e}{V}\sin\phi$

et $\cos^2 X = 1 - \sin^2 X = 1 - \frac{v_e^2}{V^2}\sin^2\phi$

D'où $V^2\cos^2 X - v_e^2\cos^2\phi = V^2 - v_e^2\sin^2\phi - v_e^2\cos^2\phi = V^2 - v_e^2$.

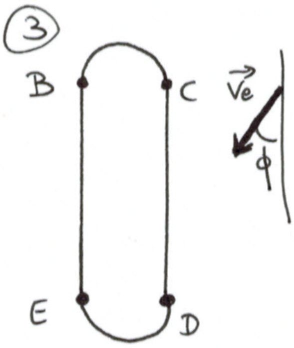
soit $$t_{A-B} - t_{A-B}^{(0)} = \frac{2AB}{V}\left(\frac{V^2\cos X - V^2 + v_e^2}{V^2 - v_e^2}\right).$$

Or $\cos X = \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{V^2}\sin^2\phi} > \sqrt{1 - \frac{v_e^2}{V^2}} = \frac{1}{V}\sqrt{V^2 - v_e^2}$

donc $V^2\cos X - V^2 - v_e^2 > V\sqrt{V^2 - v_e^2} - (V^2 - v_e^2) = \underbrace{\left(V - \sqrt{V^2 - v_e^2}\right)}_{>0}\sqrt{V^2 - v_e^2} > 0$

Donc, tant que $|V| > |v_e|$, on aura toujours $\boxed{t_{A-B} > t_{A-B}^{(0)}}$

③



On doit calculer t_{CD} et t_{BE} afin que $t_{BC} + t_{CD} + t_{DE} + t_{EB} = 4$ minutes.

La vitesse de l'avion a changée, il faut donc calculer le nouvel angle de compensation $X' = \text{Arcsin}\left(\frac{v_e}{V}\sin\phi\right)$ avec $V = 222$ km/h.

On obtient $\boxed{X' = 4{,}94°}$ donc $\cos X' \simeq 1$.

Avec un raisonnement identique à la question précédente, le temps d'aller-retour (hors virages) est

$$t_{BE} + t_{CD} = \frac{2V \cdot BE}{V^2 - v_e^2\cos^2\phi}$$ en faisant l'approximation $\cos X' \simeq 1$.

$$t_{BE} = \frac{BE}{V - v_e\cos\phi} \qquad t_{CD} = \frac{BE}{V + v_e\cos\phi}$$ car $BE = CD$

On a $t_B = \underbrace{t_{BC} + t_{DE}}_{2\,min} + t_{BE} + t_{CD} = 4$ min. Le problème revient donc à imposer $t_{BE} + t_{CD} = 2\,\text{min} \overset{\text{déf.}}{=} T$.

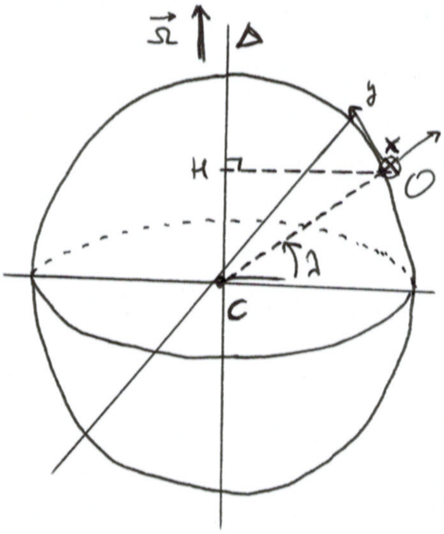
Or $t_{BE} = \frac{V + v_e\cos\phi}{V - v_e\cos\phi}\, t_{CD} \longrightarrow t_{CD}\left(1 + \frac{V + v_e\cos\phi}{V - v_e\cos\phi}\right) = T$

D'où $t_{CD} = \frac{T}{2V}(V - v_e\cos\phi)$ et $t_{BE} = \frac{T}{2V}(V + v_e\cos\phi)$.

A.N. : $\boxed{t_{CD} = 45 \text{ secondes}}$

1.2 Lancement d'un satellite

1.2.a Soit O un point à la surface de la Terre, de centre C.



⚠ la latitude est un angle orienté à partir de l'équateur.

base locale $(\vec{u_x};\vec{u_y};\vec{u_z})$ en O

$\vec{\Omega}$ vecteur rotation de la Terre sur elle-même

Rq : on est dans R_g = référentiel géocentrique donc C est fixe

R_g est supposé galiléen.

Rotation autour d'un axe fixe Δ : $\vec{V}(O) = \Omega\, HO\, \vec{u_x}$

avec H projeté orthogonal sur l'axe Δ ; alors en introduisant la latitude λ

$HO = R_T \cos\lambda$. D'où $\boxed{\vec{V} = \Omega R_T \cos\lambda\, \vec{u_x}}$

$\lambda = 46° \longrightarrow \|\vec{v}\| = 323\ m/s$

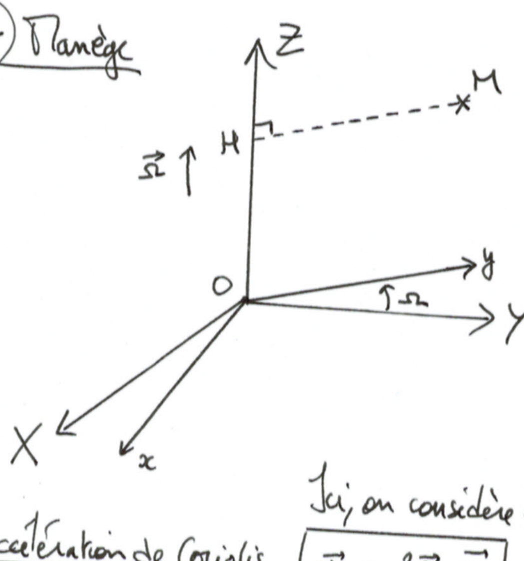
$\lambda = 28,5° \longrightarrow \|\vec{v}\| = 409\ m/s$

$\lambda = 5,23° \longrightarrow \|\vec{v}\| = 463\ m/s$

Rq : $\frac{\Omega}{2\pi} = 1\text{tour}/24h = \frac{1\ \text{tour}}{24\times60\times60} = 1,157\cdot10^{-5}\ s^{-1} \Rightarrow \Omega = 7,27\cdot10^{-5}\ rad/s$.

Il est préférable d'être le plus près possible de l'équateur pour bénéficier d'une vitesse initiale la plus importante possible afin d'économiser du carburant.

V) Manège



1) Soit H le projeté orthogonal de M sur l'axe OZ.

On a $\begin{cases} \vec{f_{ie}} = -m\vec{a_e} \\ \vec{f_{ic}} = -m\vec{a_c} \end{cases}$

avec $\vec{a_e}$ accélération du point coïncident et $\vec{a_c}$ accélération de Coriolis.

Pour une rotation uniforme : $\boxed{\vec{a_e} = -\Omega^2 \vec{HM}}$

Ici, on considère que M reste dans le plan xOy donc $H \equiv O$ soit $\boxed{\vec{a_e} = -\Omega^2 \vec{OM}}$

Accélération de Coriolis $\boxed{\vec{a_c} = 2\vec{\Omega}\wedge\vec{v_r}}$

$\vec{\Omega}(R'/R)$; vitesse relative $(\vec{v}(M/R'))$.

On a $\vec{OM} = \frac{R}{2}(1+\sin\omega_0 t)\vec{u_x} \Rightarrow \vec{v_{R'}} = \left(\frac{d\vec{OM}}{dt}\right)_{R'} = \frac{d}{dt}\left(\frac{R}{2}(1+\sin\omega_0 t)\vec{u_x}\right)_{R'} = \frac{R}{2}\omega_0\cos\omega_0 t\,\vec{u_x}$

d'où $\vec{a_c} = 2\vec{\Omega}\wedge\vec{v_{R'}} = 2\vec{\Omega}\wedge\left(\frac{R}{2}\omega_0\cos\omega_0 t\,\vec{u_x}\right)$ soit $\boxed{\vec{a_c} = R\Omega\omega_0\cos\omega_0 t\,\vec{u_y}}$

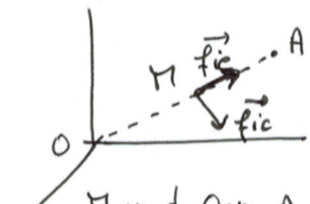
$\boxed{\vec{a_e} = -\Omega^2 R/2\,(1+\sin\omega_0 t)\vec{u_x}}$

d'où $\boxed{\vec{f_{ie}} = m\Omega^2\frac{R}{2}(1+\sin\omega_0 t)\vec{u_x}}$ $\boxed{\vec{f_{ic}} = -mR\Omega\omega_0^2\cos\omega_0 t\,\vec{u_y}}$

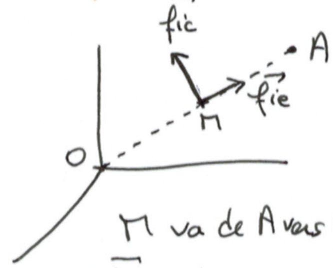
2) Si M va de O vers A, $\vec{v_r}$ est dirigé selon $\vec{OA}$ et donc $\vec{a_c}$ selon $+\vec{u_y}$; donc $\vec{f_{ic}}$ est dirigée selon $-\vec{u_y}$.

Si M va de A vers O, $\vec{v_r}$ est dirigé selon $-\vec{OA}$ et donc $\vec{a_c}$ selon $-\vec{u_y}$; donc $\vec{f_{ic}}$ est dirigée selon $+\vec{u_y}$.

$\vec{f_{ie}}$ est toujours centrifuge, dirigée selon $+\vec{u_x}$.



M va de O vers A



M va de A vers O.