CH M1 : Référentiels non galiléens

I. Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre

CE : Reconnaître et caractériser un mouvement de translation et un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un référentiel par rapport à un autre.

1) Définition d'un référentiel

Définition d'un référentiel : C'est l'ensemble d'un repère d'espace lié à un observateur ou à un solide et d'une chronologie.
On se place dans le cadre de la mécanique newtonienne (non relativiste). Alors la chronologie est la même dans tous les référentiels. Par contre en mécanique relativiste le temps ne s'écoule pas de la même façon dans tous les référentiels (dilatation des temps)
En mécanique classique, on caractérise donc un référentiel par un point d'un solide et trois vecteurs (ou trois axes) fixes par rapport à ce solide.

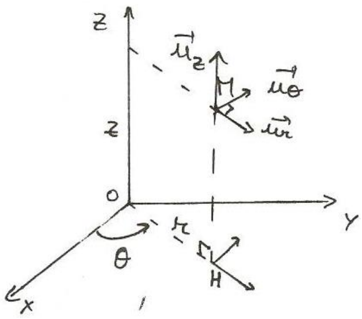
2) Rappels de cinématique du point et du solide

a) Cinématique du point

a1) Définitions : Dans un référentiel R ,

Position $\overrightarrow{OM}$, vitesse $\vec{V}_R(M)=\left(\dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_R$, accélération $\vec{a}_R(M)=\left(\dfrac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}\right)_R$

a2) Expressions en coordonnées cylindriques



$\overrightarrow{OM}=r\vec{u}_r+z\vec{u}_z$

$$\boxed{\frac{d\vec{u}_r}{dt}=\dot{\theta}\vec{u}_\theta \text{ et } \frac{d\vec{u}_\theta}{dt}=-\dot{\theta}\vec{u}_r}$$

$\vec{V}_R(M)=$

$\vec{a}_R(M)=$

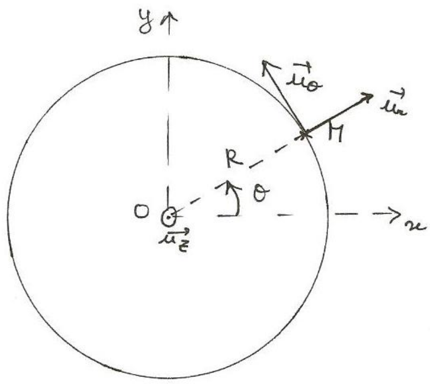
a3) Application au mouvement circulaire d'axe (Oz) et de rayon R :

$\boldsymbol{\overrightarrow{OM}=R\vec{u}_r}+z\vec{u}_z$

La vitesse $\vec{V}_R(M)=$ est tangente à la trajectoire.

Posons $\vec{\Omega}=\dot{\theta}\vec{u}_Z$ le vecteur rotation,

alors elle s'écrit aussi $\boxed{\vec{V}_R(M)=\qquad\qquad}$



$\vec{a}_R(M)=$

Pour un mouvement circulaire uniforme :

Soit $\dot{\theta}=\omega$ la vitesse angulaire de rotation qui est donc uniforme,

la vitesse $\vec{V}_R(M)=$ est de norme constante $V=$

l'accélération est centripète :

$\boxed{\vec{a}_R(M)=\qquad\qquad=\qquad\qquad}$.

Lien avec le trièdre de Frenet :

$\vec{T}=$ $\vec{N}=$

$\vec{V}=$ $\vec{a}=$

b) Cinématique du solide

b1) Définition et repérage d'un solide

Def : Un solide est un corps indéformable ;
Les différents points d'un solide sont à distance constante les uns des autres.

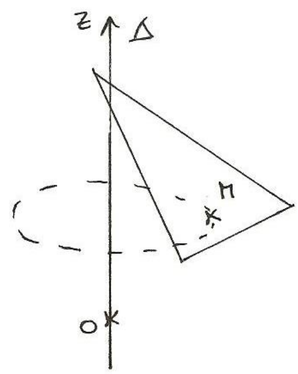
Repérage : La position d'un solide est repérée par 6 paramètres :
- les 3 coordonnées d'un point
- 3 angles

b2) Translation d'un solide :

Def : Un solide a un mouvement de translation si quels que soient A et B deux points du solide, le vecteur $\overrightarrow{AB}$ reste constant au cours du temps.

Conséquence :
Tous les points du solide ont la même vitesse donc tous les points du solide ont des trajectoires identiques.
Exemples :
Translation rectiligne : Translation circulaire :

b3) Rotation d'un solide autour d'un axe fixe



Dans un référentiel R, on choisit un repère tel que $\Delta = (O, \vec{u}_Z)$

Def : Le solide S est en rotation dans R autour de l'axe Δ si tous les points de S décrivent dans R des cercles d'axe Δ.

En coordonnées cylindriques d'axe Δ, $\vec{v}_R(M) =$

Si $\vec{u}_Z$ définit le sens positif des angles θ, **le vecteur rotation de S** est : $\vec{\Omega} = \dot{\theta}\vec{u}_Z$
Alors $\forall M \in S$ et pour $O \in \Delta$, $\vec{v}_R(M) =$

b4) Cas général

Le mouvement général d'un solide est la combinaison d'une translation à la vitesse du barycentre (mouvement d'ensemble) et d'une rotation autour du barycentre (mouvement propre).

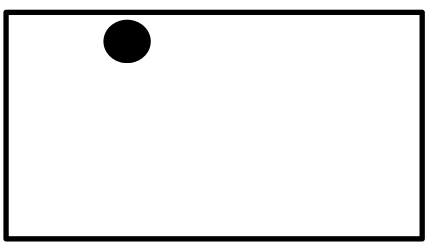
3) Translation d'un référentiel par rapport à un autre

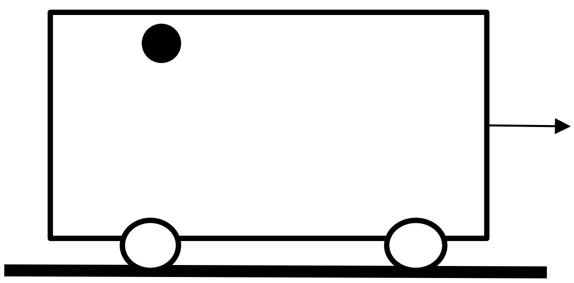
Def : Considérons un premier référentiel R. Un autre référentiel **R' est en translation par rapport à R si** le solide de référence S' de R' est en mouvement de translation dans R. Cela signifie que **les axes définissant R' conservent la même orientation par rapport à ceux de R**, on les choisit parallèles.

Ce mouvement est caractérisé par la **vitesse relative de R' par rapport à R :** $\boldsymbol{\vec{V}(R'/R)}$, c'est la vitesse de translation de S' dans R. Cette vitesse peut varier en direction et en norme au cours du temps.

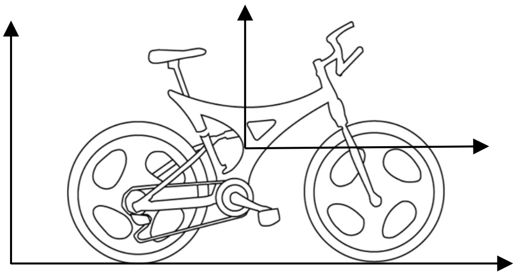
Exemples : translation rectiligne uniforme, translation rectiligne uniformément accélérée, translation circulaire, translation elliptique…

Exemple : une balle qui tombe dans un train de vitesse constante.
Trajectoire pour un voyageur dans le train : Trajectoire pour un observateur sur le quai :





Cas du référentiel barycentrique : exemple d'un vélo



Référentiel du laboratoire :

Définition du référentiel barycentrique :

Le mouvement propre est le mouvement

Le mouvement d'ensemble est le mouvement

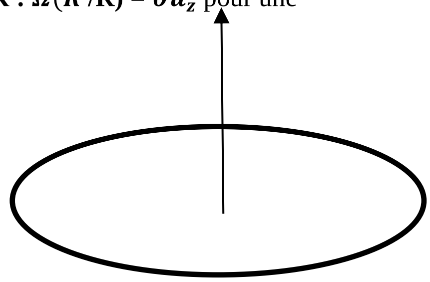
Exemple de la roue avant pour un vélo de trajectoire rectiligne :

4) Rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un référentiel par rapport à un autre

Déf : Un référentiel R' est en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans R si le solide de référence S' de R' est en rotation uniforme autour d'un axe fixe dans R.

Le vecteur rotation de R' par rapport à R est le **vecteur rotation de S' dans R : $\vec{\Omega}(R'/R) = \dot{\theta}\overrightarrow{u_z}$** pour une rotation d'axe (Oz) repérée par un angle θ.
CE : Exprimer le vecteur rotation d'un référentiel par rapport à un autre.

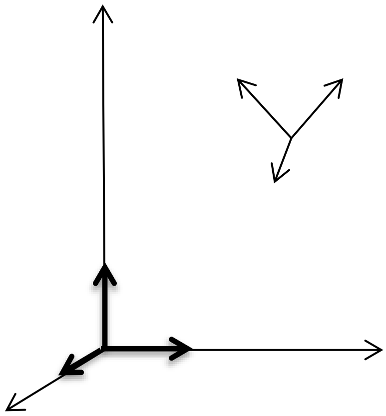
Exemple : mouvement sur un manège.



II. Lois de composition des vitesses et des accélérations

1) Changement de référentiel pour la dérivée d'un vecteur

Le vecteur $\vec{A} = A_{x'}\vec{u}_{x'} + A_{y'}\vec{u}_{y'} + A_{z'}\vec{u}_{z'}$,où $\vec{u}_{x'}, \vec{u}_{y'}$ et $\vec{u}_{z'}$ sont liés au référentiel R',
se dérive différemment dans R' :



$$\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_{R'} =$$

et dans R :

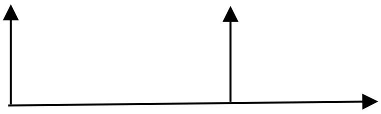
$$\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_{R} =$$

Démo de $\left(\frac{d\vec{u}_{x'}}{dt}\right)_R = \vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \vec{u}_{x'}$:

$$\boxed{\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_R = \left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_{R'} + \vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \vec{A}}$$

CE : Relier les dérivées d'un vecteur dans des référentiels différents par la formule de la dérivation composée.

2) Cas de référentiels en translation relative $\overrightarrow{\Omega_{R'/R}} =$



a) Loi de composition des vitesses

Vitesse absolue $\vec{V}_a(M) = \vec{V}_R(M) = \left(\dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_R$

Vitesse relative $\vec{V}_r(M) = \vec{V}_{R'}\ (M) = \left(\dfrac{d\overrightarrow{O'M}}{dt}\right)_{R'}$

$\boxed{\vec{V}_a(M) = \vec{V}_r(M) + \vec{V}_e(M)}$ avec la vitesse d'entrainement $\boxed{\vec{V}_e(M) = \qquad\qquad =\qquad\qquad}$

Démo :

Exemple : vitesse d'un homme qui marche dans un train.
Un train roule à la vitesse de 60km.h^{-1}. Dans le train un contrôleur marche vers l'avant du train à la vitesse de 4km.h^{-1}. Quelle est la vitesse du contrôleur par rapport à une vache couchée dans un pré ?

Définition du point coïncidant : On appelle point coïncidant P du point M dans R' à l'instant t le point P du référentiel R' qui à l'instant t coïncide avec M.

Illustrer sur la roue du vélo :

$\vec{V}_e(M) = \quad \vec{V_R}(\,P \text{ le point coïncidant de } M \text{ dans } R')$ **La vitesse d'entrainement est la vitesse du point coïncidant.**

Car si M est dans R', alors

b) Loi de composition des accélérations

Accélération absolue $\vec{a}_a(M) = \vec{a}_R\ (M) = \left(\dfrac{d\overrightarrow{V_a}}{dt}\right)_R$

Accélération relative $\vec{a}_r(M) = \vec{a}_{R'}\ (M) = \left(\dfrac{d\overrightarrow{V_r}}{dt}\right)_{R'}$

$\boxed{\vec{a}_a(M) = \vec{a}_r(M) + \vec{a}_e(M)}$ avec l'accélération d'entrainement : $\boxed{\vec{a}_e(M) = \qquad\qquad}$

Démo :

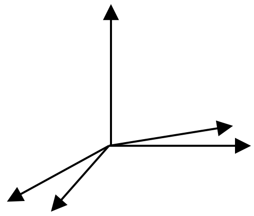
Exemple : Une personne laisse tomber ses clés dans un ascenseur possédant l'accélération a=1m.s^{-2} vers le bas.

a) Quelle est l'accélération des clés dans le référentiel terrestre ?

b) Quelle est l'accélération des clés dans le référentiel lié à l'ascenseur ?

c) Pour quelle accélération a les clés semblent-elles flotter dans l'ascenseur ?

3) Cas de référentiels en rotation relative uniforme autour d'un axe fixe



O' = O et R' est en rotation autour de (Oz) fixe dans R à la vitesse angulaire ω constante

$\overrightarrow{\Omega_{R'/R}} =$

a) Loi de composition des vitesses

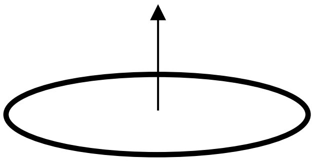
$\boxed{\vec{V}_a(M) = \vec{V}_r(M) + \vec{V}_e(M)}$ avec la vitesse d'entrainement $\boxed{\vec{V}_e(M) = \qquad\qquad}$

Démo :

Rem : $\vec{V_e}(M) = \vec{V_R}(P\ point\ coïncidant)$

Expression simplifiée de la vitesse d'entrainement en coordonnées polaires : $\boxed{\vec{V}_e(M) = \qquad\qquad}$

Exemple : mouvement d'un enfant sur un manège. L'enfant part du centre et se dirige vers un point A de la périphérie avec une vitesse constante v_0 par rapport au manège. Le manège tourne à vitesse angulaire constante ω. Calculer la vitesse de l'enfant par rapport au référentiel terrestre en utilisant la loi de composition des vitesses.



b) Loi de composition des accélérations

$\boxed{\vec{a}_a(M) = \vec{a}_r(M) + \vec{a}_e(M) + \vec{a}_C(M)}$

avec l'accélération d'entrainement qui est celle du point coïncidant :

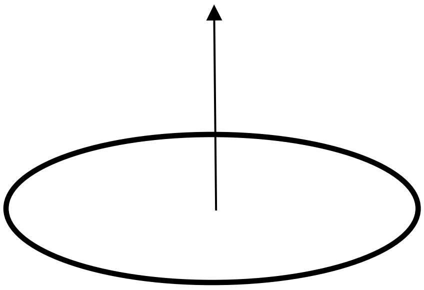
$\boxed{\vec{a}_e(M) = \qquad\qquad\qquad\qquad}$ où $\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_{R'/R}$

et l'accélération de Coriolis (ou complémentaire) $\boxed{\vec{a}_C(M) = \qquad\qquad}$

Démo :

Expression simplifiée de l'accélération d'entraînement : $\boxed{\vec{a}_e(M) = -\omega^2 \overrightarrow{HM}}$ où H est le projeté orthogonal de M sur l'axe de rotation (Oz). C'est une **accélération centripète** (vers le centre de la rotation)
Démo :

Exemple de l'enfant marchant dans un manège : l'enfant se dirige du centre O vers le point A avec une accélération constante γ par rapport au manège. Exprimer l'accélération de l'enfant par rapport au référentiel terrestre en utilisant la loi de composition des accélérations.



4) **Cas général** (hors programme mais parfois utile…)

a) Loi de composition des vitesses

$\vec{V}_a(M) = \vec{V}_r(M) + \vec{V}_e(M)$ avec la vitesse d'entrainement $\vec{V}_e(M) = \vec{V}_R(O') + \vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \overrightarrow{O'M}$

b) Loi de composition des accélérations

$\vec{a}_a(M) = \vec{a}_r(M) + \vec{a}_e(M) + \vec{a}_C(M)$
avec l'accélération d'entrainement (qui est celle du point coïncidant) :

$\vec{a}_e(M) = \vec{a}_R(O') + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \wedge \overrightarrow{O'M} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \overrightarrow{O'M})$ où $\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_{R'/R}$

et l'accélération de Coriolis (ou complémentaire) $\vec{a}_C(M) = 2\vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \vec{V}_r$

CE : Citer et utiliser les expressions de la vitesse d'entrainement et des accélérations d'entraînement et de Coriolis dans le cas d'une translation, et dans le cas d'une rotation uniforme autour d'un axe fixe.

III. Dynamique en référentiel non galiléen

1) Forces d'inertie

Définition d'un référentiel galiléen , c'est la première loi de Newton ou principe d'inertie : il existe une classe de référentiels, dits galiléens, dans lesquels le mouvement d'un point isolé est un mouvement rectiligne uniforme.

Soit Rg un référentiel galiléen, et R un référentiel en translation par rapport à Rg ou en rotation uniforme autour d'un axe lié à Rg.
Principe fondamental de la dynamique (deuxième loi de Newton) appliqué à un point M dans Rg :

Loi de composition des accélérations :

D'où $$m\vec{a}_R(M) = \vec{F} - m\vec{a}_e(M) - m\vec{a}_c(M)$$

On identifie les deux derniers termes à des forces d'inertie :

- La force d'inertie d'entraînement $\vec{F}_e = -m\vec{a}_e$

  Dans le cas d'une translation de R par rapport à Rg : $\vec{F}_e =$

  Dans le cas d'une rotation de R par rapport à Rg : $\vec{F}_e =$. C'est une force centrifuge.
- La force d'inertie de Coriolis $\vec{F}_c = -m\vec{a}_c =$

  Elle est nulle si R est en translation par rapport à Rg.

CE : Exprimer les forces d'inerties, dans les seuls cas où le référentiel entraîné est en translation, ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen.
CE : Décrire et interpréter les effets des forces d'inertie dans des cas concrets : sens de la force d'inertie d'entraînement dans un mouvement de translation ; caractère centrifuge de la force d'inertie d'entraînement dans le cas où le référentiel est en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen.

Exemple 1 : Une voiture sur une route rectiligne qui roule à vitesse constante puis freine brusquement. Quelle est la force d'inertie qui s'applique sur les occupants de la voiture ? AN si la voiture passe de v = 50 km.h^{-1} à l'arrêt en Δt=1s.

Exemple 2 : Un manège est en rotation à la vitesse angulaire ω constante autour de (Oz). Dans le référentiel du manège, quelle force d'inertie s'exerce sur une personne immobile sur le manège à la distance d=5m de l'axe (Oz)? A quelle vitesse angulaire ω cette force a-t-elle-même norme que le poids de la personne ?

2) Deuxième loi de Newton en référentiel non galiléen R

La deuxième loi de newton appliquée à un système S de masse m et de barycentre G dans R donne :

$m\vec{a}_R(G) = \vec{F}_{extérieures\ vraies} + \vec{F}_e + \vec{F}_c$ avec $\vec{F}_e = -m\vec{a}_e(G)$ et $\vec{F}_c = -m\vec{a}_c(G)$

Deux référentiels galiléens sont nécessairement en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre, alors les accélérations d'entrainement et de Coriolis sont nulles. *(CE de Sup)*

3) Théorème du moment cinétique en référentiel non galiléen

Quelques rappels :

Définition du moment cinétique en O pour un point M: $\overrightarrow{L_{O}}_{/R}(M) =$

Pour un solide S en translation : soit G le barycentre de S, $\overrightarrow{L_{O}}_{/R}(S) =$

Pour un solide S en rotation de vitesse angulaire ω autour d'un axe fixe orienté Δ=(O,$\overrightarrow{u_z}$) :

$\overrightarrow{L_{O}}_{/R}(S) =$

et L_Δ (S)=

avec le moment d'inertie du solide : J_Δ =

Cas général (hors programme mais utile) :

Moment en O d'une force s'appliquant en M : $\overrightarrow{M_0} =$

Théorème du moment cinétique **en un point fixe O** dans R_g galiléen: $\dfrac{d\vec{L}_O}{dt} = \vec{M}_{O(actions\ extérieures)}$

Théorème du moment cinétique **par rapport à un axe fixe Δ** :

Si Δ est l'axe orienté $(O,\vec{k})$, $\dfrac{dL_\Delta}{dt} = M_{\Delta actions\ extérieurs}$ avec $L_\Delta = \vec{L}_0 \bullet \vec{k}$ et $M_\Delta = \vec{M}_0 \bullet \vec{k}$

Rem : le programme ne traite que la dynamique du point en référentiel non galiléen

Théorème du moment cinétique pour un point M en un point fixe O dans R non-galiléen:

$\dfrac{d\vec{L}_O}{dt} = \vec{M}_{O(actions\ extérieures)} + \vec{M}_{O\,e} + \vec{M}_{O\,c}$

avec $\vec{M}_{O\,e} =$ et $\vec{M}_{O\,C} =$

4) Energétique en référentiel non galiléen

a) Rappels sur l'énergie cinétique

Energie cinétique d'un point :

Energie cinétique d'un solide en translation :

Energie cinétique d'un solide en rotation autour d'un axe fixe Δ :

Cas général (hors programme mais très utile) :

b) Travail de la force de Coriolis

La force de Coriolis est toujours normale à la vitesse relative donc elle **ne travaille pas**.
Démo :

c) Enoncé des théorèmes énergétiques

Théorème de la puissance cinétique :

$$\frac{dE_{c/R}}{dt} = P_{/R}(actions\ extérieures\ et\ intérieures) + P_{/R}(entraînement)$$

Théorème de l'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = W_{/R}(actions\ extérieures\ et\ intérieures) + W_{/R}\ (entraînement)$$

Travail d'une force appliquée à un point M dans R:

Travail du torseur des actions mécaniques $(\vec{F}, \overrightarrow{M_0})$ appliqué à un solide S :

Définition de l'énergie potentielle : Une force $\vec{F}$ est dite conservative si son travail ne dépend pas du chemin suivi. On définit alors une fonction énergie potentielle associée à $\vec{F}$ par $W_{AB}(\vec{F}) = E_p(A) - E_p(B) = -\Delta E_p$.
On dit que $\vec{F}$ dérive de l'énergie potentielle E_p.

Dans le cas d'une force appliquée à un point : $\vec{F} =$

Définition de l'énergie mécanique : $E_m = E_c + E_p$

Théorème de l'énergie mécanique :

$$\Delta E_m = W_{/R}(actions\ non\ conservatives\ incluant\ la\ force\ d'entraînement)$$

Cas de conservation de l'énergie mécanique : c'est le cas où toutes les forces qui travaillent dérivent d'une énergie potentielle. On dit que le mouvement est conservatif.

d) Energie potentielle d'entraînement pour un référentiel R en translation rectiligne uniformément accélérée par rapport à R_g

Si $\vec{a}_{R/Rg} = a\,\vec{u}_x$, $E_p =$
Démo :

e) Energie potentielle associée à la force d'entraînement centrifuge

Si R est en rotation uniforme de vitesse angulaire ω autour de l'axe fixe (Oz) par rapport à R_g, ,
$E_p =$

Démo :

5) Exemple : pendule simple dont l'extrémité oscille :

On fabrique un pendule simple en accrochant un point matériel M de masse m à un fil sans masse de longueur L que l'on attache à un anneau A coulissant le long de l'axe (Oy). On donne au point A un mouvement oscillatoire par rapport au référentiel terrestre Rg supposé galiléen : $\overrightarrow{OA} = y_0 \cos(\omega t)\vec{u}_y$. L'angle entre le fil et la verticale est repéré par l'angle θ(t). On se place dans le référentiel R lié au repère (A, $\vec{u}_x$, $\vec{u}_y$, $\vec{u}_z$).

a) Quel est le mouvement du référentiel R par rapport à Rg ? Quel est celui de la masse m dans R ?
b) Appliquer à la masse m dans le référentiel R le théorème du moment cinétique par rapport à l'axe (Ax). En déduire une équation différentielle vérifiée par θ(t).
c) Retrouver cette équation par application du théorème de l'énergie cinétique dans R.
d) On étudie les petites oscillations autour de la position d'équilibre. Calculer l'amplitude de ces oscillations.

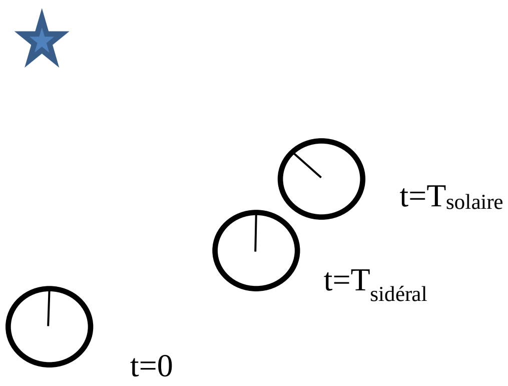
IV Quelques manifestations du caractère non galiléen des référentiels terrestre et géocentrique

1) Définition des référentiels de Copernic, géocentrique et terrestre

Référentiel de Copernic R_C: son centre est le barycentre du système solaire et ses axes pointent vers trois étoiles suffisamment éloignées pour être considérées fixes. C'est le référentiel naturel pour l'étude du mouvement des planètes. Il est alors considéré comme galiléen. Mais on pourrait prendre en compte le mouvement du centre de masse du système solaire par rapport au centre de masse de notre galaxie (la voie lactée), ce qui lui ferait perdre son caractère galiléen.

Référentiel géocentrique R_G: son centre est le centre de la Terre et ses axes sont les mêmes que ceux du référentiel de Copernic. Il est donc en translation elliptique (quasi-circulaire) par rapport au référentiel de Copernic. Son centre tourne autour du soleil en un an.

Référentiel terrestre R_T: c'est le référentiel lié à la Terre. Il est donc en rotation par rapport au référentiel géocentrique. Sa vitesse angulaire de rotation est $\omega=2\pi/(24*3600)=7,3.10^{-5}rad.s^{-1}$ ou plus précisément sa période de rotation est de un jour sidéral T=23h56min4s. C'est celui qu'on appelle référentiel du laboratoire.



Jour sidéral : C'est le temps que met la Terre pour faire un tour sur elle-même par rapport à une étoile fixe.

Jour solaire : C'est la durée qui sépare deux culminations du Soleil.

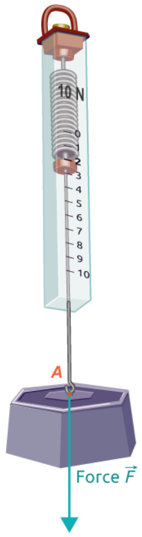
2) Caractère galiléen approché de ces référentiels

Dans la plupart des applications classiques (de durée courte devant un jour), le référentiel terrestre peut être considéré galiléen. Cela signifie que, avec la précision de nos mesures, on peut appliquer les lois de Newton sans tenir compte des forces d'inertie. Mais si on étudie très finement des expériences sur de grandes échelles de temps ou d'espace, R_T apparaît non galiléen.

Les effets de la rotation propre (définition du poids, effets de la force de Coriolis dont déviation vers l'Est…) sont plus importants que ceux de la translation elliptique (forcées de marées). *Détaillés pages suivantes et en TD.*

CE : Citer quelques manifestations du caractère non galiléen du référentiel terrestre.

3) Conséquences de la rotation propre de la Terre : définition du poids et effets de la force de Coriolis



a) Définition du poids

Introduction :

Masse en équilibre suspendue à un dynamomètre
BAME dans le référentiel terrestre R_T :

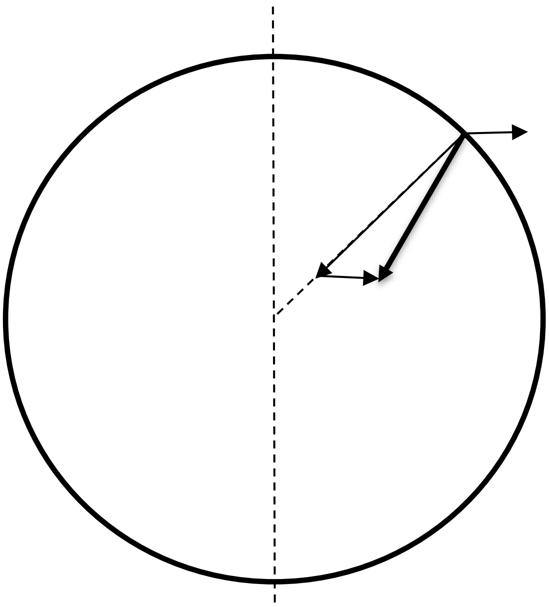
On définit le poids comme la somme de la force d'attraction gravitationnelle de la Terre et la force d'inertie centrifuge due à la rotation de la Terre $\vec{P} =$.

Le champ de pesanteur est donc $\vec{g} =$

Les deux composantes n'ont pas la même importance : g_0 = 9,8198 m.s^{-2} alors que $\omega^2 R_T$ = 3,4.10^{-2} m.s^{-2}
Et elles n'ont pas la même direction.

Conséquences :

- La verticale ne passe pas tout à fait par le centre de la Terre :



- La norme du champ de pesanteur n'est pas uniforme sur la surface de la Terre. (par effet de la rotation de la Terre mais aussi de son aplatissement)

Exemples : A l'équateur g = 9,78 m.s^{-2} Au pôle g = 9,83 m.s^{-2} A Paris g = 9,81 m.s^{-2}

b) <u>Effets de la force de Coriolis</u> $\vec{F}_c = -2m\vec{\Omega}_{R_T/R_G} \wedge \vec{V}_r$

Dans la grande majorité des cas, la force de Coriolis est négligeable.

CE : Estimer, en ordre de grandeur, la contribution de la force d'inertie de Coriolis dans un problème de dynamique terrestre.

Exemple d'une balle de tennis de masse m=60g envoyée à 200km.h^{-1} *:*

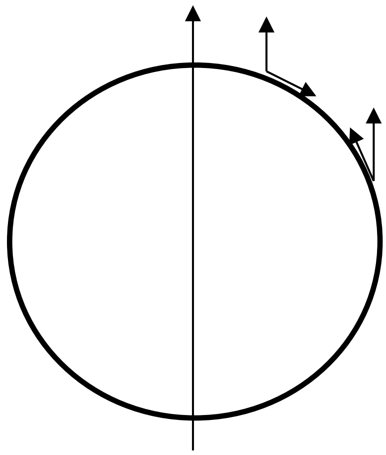
Quelques effets de la force de Coriolis :

- la déviation vers l'Est des corps en chute libre (Ex 5 TD)

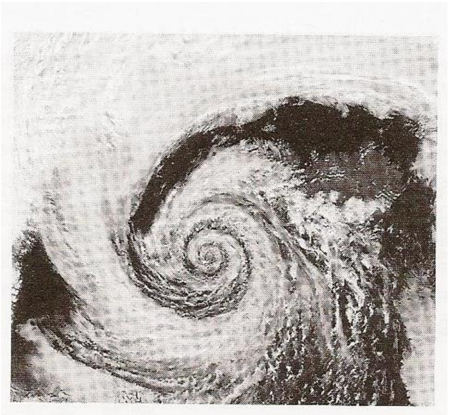
- la rotation du plan d'oscillations du pendule de Foucault (voir la vidéo https://youtu.be/YhXLxc1hzxM)

- le sens de rotation des systèmes dépressionnaires dans les hémisphères nord et sud. Explication :

Système dépressionnaire donc la pression est plus faible au centre. On en déduit le sens du vent :



Dans l'hémisphère nord :



Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis fait tourner les dépressions dans le sens

Et dans l'hémisphère sud dans le sens

4) Conséquences de la translation elliptique de la Terre : forces de marées

On se place dans le référentiel géocentrique R_G. On étudie le mouvement d'un point M à la surface de la Terre. Il est soumis au champ de gravitation terrestre, au champ de gravitation d'un autre astre A (le Soleil ou la Lune), à la force d'inertie d'entraînement due à la translation elliptique de la Terre et éventuellement à une autre force vraie $\vec{F}$.

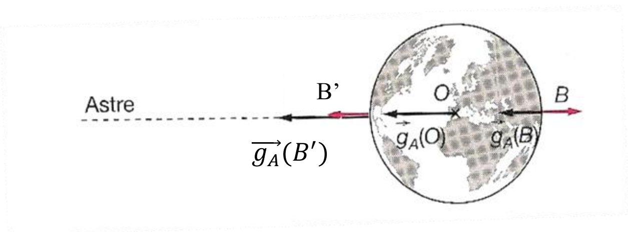
La deuxième loi de Newton appliquée à M dans R_G non galiléen donne :

Si A est le soleil on applique aussi la deuxième loi de Newton à la Terre dans le référentiel de Copernic :

On en déduit :

La **force de marée** en M due à l'astre A est : $\overrightarrow{F_{marée}} = m\overrightarrow{g_A(M)} + \overrightarrow{F_{ie}}$ = $m(\vec{g}_A(M) - \vec{g}_A(O))$.

Cette force de marée est due à la différence du **champ gravitationnel** de l'astre A aux points M et O. Elle est responsable des marées terrestres.



Les forces de marée en B et B' sont de même intensité mais de sens opposé. C'est ce qui explique qu'on observe en général deux marées par jour.