

LP03 - Caractère non-galiléen du référentiel terrestre

Clément (de la Salle et Colléaux)

8 juin 2020

Niveau : L2

Bibliographie

- ↻ *Mécanique*, **Brasselet** → Paraît qu'il est ouf! Oh il l'est t'inquiète
- ↻ *H-Prépa Mécanique MPSI - PCSI - PTSI*, **Brebec** → Très propre sur le pendule, couverture bleue!
- ↻ *Poly* de **JRS** → Sympa
- ↻ J'intègre MP →
- ↻ Une vidéo → Pendule de FOUCAULT... Cette chaîne est incroyable <3

Prérequis

- Mécanique du point
- Changement de référentiel
- Champs gravitationnel
- Pseudo-forces

Expériences



Table des matières

Table des matières	1
1 Référentiel terrestre	2
1.1 À la recherche d'un référentiel galiléen	2
1.2 Dynamique	4
2 Statique dans le référentiel terrestre	5
2.1 Champ de pesanteur	5
2.2 Forme de la terre	6
3 Mouvement dans le référentiel terrestre	7
3.1 Pendule de FOUCAULT	7
3.2 Déviation vers l'est	9
3.3 Vents géostrophiques	10

Introduction

On parle pas des marées parce que c'est plutôt le caractère non-galiléen du référentiel géocentrique qui rentre en compte. Mais sinon, aller voir cette série de vidéos tout bonnement magnifiquement bien expliquée.

1 Référentiel terrestre

1.1 À la recherche d'un référentiel galiléen

♣ *Brasselet p.158*

♣ *Brébec p.204*

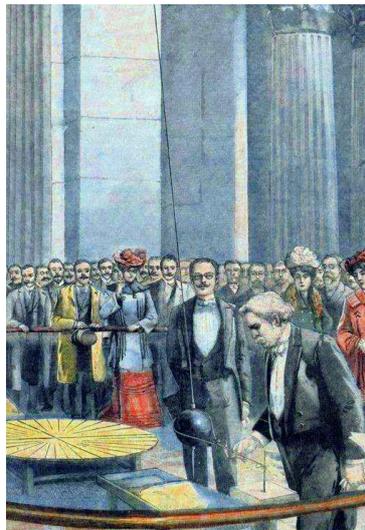


FIGURE 1.1 – Image qui vient du petit parisien illustré à l'époque (2 novembre 1902) de la mise au point du pendule de FOUCAULT

On tente une approche par dans le sens de la recherche d'un référentiel galiléen, mais on peut faire l'inverse et "bêtement" (sans aucun jugement!) définir les référentiels de COPERNIC puis géocentrique puis terrestre.

Le principe d'inertie postule l'existence d'au moins un référentiel galiléen, tentons d'en trouver un! On rappelle qu'un référentiel galiléen est un référentiel dans lequel les lois de NEWTON peuvent s'appliquer. On est tenté de dire que notre référentiel, celui de la salle de classe dans laquelle on se trouve le jury et moi, est galiléen. En fait il s'agit du référentiel terrestre :

Référentiel terrestre Origine au centre de masse de la terre. L'un des axes pointe dans la direction de la rotation et les deux autres vont de l'origine vers des points fixes à la surface de la Terre. Le problème c'est qu'on observe des choses bizarres comme le pendule de FOUCAULT : 'tite vidéo à 4'30" ce serait bien d'estimer le temps qui se passe pendant les ellipses...

Référentiel géocentrique Origine au centre de la Terre, mais les trois axes pointent vers des étoiles lointaines¹. Mais pareil, il se passe encore des trucs bizarres genre les marées...

Référentiel de COPERNIC Origine au centre de masse du système solaire et trois axes dirigés vers trois étoiles lointaines. Bon, lui aussi il est accéléré et tourne autour du centre de la Voie Lactée, mais globalement c'est tellement long qu'à l'échelle de l'espèce humaine, on est tranquilles!

1. Tu t'es déjà demandé, étant enfant pourquoi la Lune et le Soleil te suivait en voiture? C'est la même chose ici : les étoiles sont loins donc la translation du référentiel géocentrique, sont des déplacements négligeables et ne changent pas la position des étoiles. Oui mais les étoiles elles bougent?... Ok mais sur des échelles de temps de l'ordre de la rotation du système solaire autour du trou noir de la Voie Lactée 200 millions d'années.

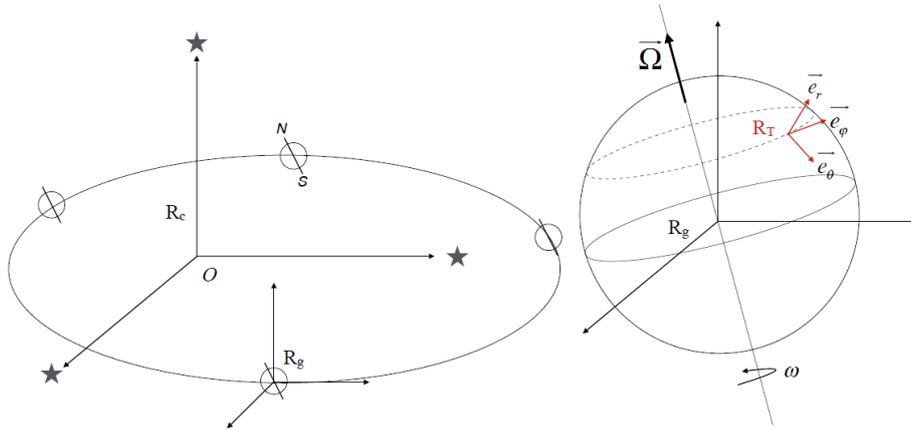


FIGURE 1.2 – Différents référentiels

Ainsi le référentiel terrestre est en rotation autour du référentiel géocentrique, lui-même en translation elliptique dans le référentiel de COPERNIC. Il semblerait que les effets non-galiléens des référentiels apparaissent sur des temps suffisamment longs :

- Au bout d’une heure environ pour le caractère non-galiléen du référentiel terrestre (FOUCAULT)
- Échelle de la saison pour le référentiel géocentrique (Marées plus fortes aux équinoxes)
- Du coup quelques millions d’années avant de ressentir les effets de non-galiléenité du référentiel de COPERNIC... On est larges !)

Jour sidéral

La rotation de la Terre sur elle-même doit être prise par rapport au référentiel géocentrique, donc la période n’est pas exactement un jour. En effet, en un jour, la Terre a tourné d’un peu plus de 2π ($\frac{366.25}{365.25}$ fois plus).

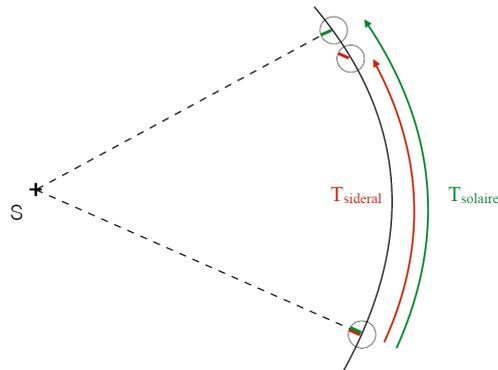


FIGURE 1.3 – En 24h, la Terre a tourné de 2π plus un peu plus à cause du fait qu’elle s’est également déplacé autour du Soleil.

La pulsation de rotation que l’on va utiliser dans toute la suite de la leçon est donc

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{sid}} = \frac{2\pi}{\frac{366.25}{365.25} T_{sol}} = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Avec le jour solaire, on obtient $\omega = 7.27 \cdot 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2 Dynamique

On a réussi à remonter à un référentiel galiléen donc on va pouvoir s'y rattacher pour décrire les lois du mouvement dans le référentiel terrestre (cf. cours précédent). Notons que pour décrire seulement le caractère non-galiléen du référentiel terrestre, on va considérer que le référentiel géocentrique est galiléen ! Notons \mathcal{R}_T et \mathcal{R}_G ces référentiels de centres $O_T = O_G$. La composition des vitesses et des accélérations s'écrit \blacktriangle *Brébec p.177* :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{v}_{/R}(M) = \vec{v}_{/R'}(M) + \vec{v}_{/R}(O') + \vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \overrightarrow{O'M} \\ \vec{a}_{/R}(M) = \underbrace{\vec{a}_{/R'}(M)}_{\text{translation}} + \underbrace{2\vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \vec{v}_{/R'}(M)}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\vec{\Omega}_{R'/R} \wedge (\vec{\Omega}_{R'/R} \wedge \overrightarrow{O'M}) + \frac{d\vec{\Omega}_{R'/R}}{dt} \Big|_R \wedge \overrightarrow{O'M}}_{\text{entraînement}} \end{array} \right.$$

FIGURE 1.4 – Loi de composition des vitesses et des accélérations dans le cas le plus général.

On peut balancer directement la forme dans notre cas particulier. Ici, on a dit que $O = O'$ et de plus, les variations de Ω sont très lentes (de l'ordre de 10 000 ans). Et comme on n'a pas de translation, $\mathbf{a}_{\mathcal{R}_G} = \mathbf{0}$

$$\mathbf{a}_{\mathcal{R}_G}(M) = \mathbf{a}_{\mathcal{R}_T}(M) + \underbrace{2\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times \mathbf{v}_{\mathcal{R}_T}(M)}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times (\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times \mathbf{OM})}_{\text{entraînement}}$$

Ainsi dans le PFD, il faut ajouter deux pseudo-forces :

$$m\mathbf{a}_{\mathcal{R}_T} = \mathbf{F} - \underbrace{2m\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times \mathbf{v}_{\mathcal{R}_T}(M)}_{\text{Coriolis}} - \underbrace{m\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times (\Omega_{\mathcal{R}_T/\mathcal{R}_G} \times \mathbf{OM})}_{\text{entraînement}}$$

Avec $\mathbf{F} = m\mathbf{a}_{\mathcal{R}_G}$ les forces dans le référentiel géocentrique (galiléen!).

OdG

La force d'inertie d'entraînement est maximale à l'équateur et y vaut $\sim 6.3 \cdot 10^6 \times (7.39 \cdot 10^{-5})^2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. La force de CORIOLIS, quand à elle dépend du mouvement dans \mathcal{R}_T . Pour qu'elle soit comparable à la force d'inertie d'entraînement, il faut une vitesse d'environ $v \sim 6.3 \cdot 10^6 \times 7.39 \cdot 10^{-5} \sim 4 \cdot 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

On peut donc en déduire deux choses :

- Ces effets sont négligeables devant les forces normalement étudiées (genre $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
- La force de CORIOLIS ne se ressent que pour des grandes vitesses ou bien des temps longs

Hypothèses

Si on veut prendre en compte en plus le non-galiléanité de \mathcal{R}_G , il faut prendre en compte les forces de marées dans ce terme

$$\sum_{\text{astres } i} (\mathbf{G}_i(M) - \mathbf{G}_i(O)) \sim 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

De même pour les variations du vecteur rotation, on obtient un terme négligeable en $10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Dans la suite de la leçon, nous allons étudier l'influence de chaque terme en commençant par la force d'inertie d'entraînement.

2 Statique dans le référentiel terrestre

2.1 Champ de pesanteur

🚩 *Brébec p.212*

Ici on s'intéresse uniquement aux effets de la force d'inertie d'entraînement, on considère que la vitesse dans le référentiel galiléen est nulle. La force d'inertie d'entraînement peut se réécrire en décomposant le vecteur \mathbf{OM} en une composante parallèle et une composante perpendiculaire à $\boldsymbol{\Omega}$

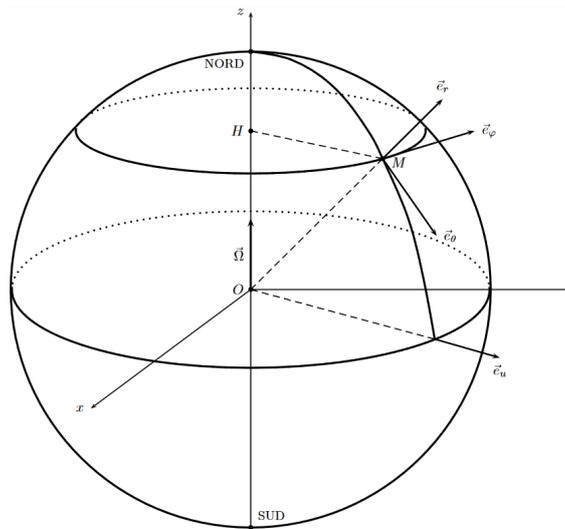


FIGURE 2.1 – On décompose $\mathbf{OM} = \mathbf{OH} + \mathbf{HM}$

On décompose $\mathbf{OM} = \mathbf{OH} + \mathbf{HM}$ de sorte que la force s'écrive

$$\mathbf{F}_{ie} = m\omega^2\mathbf{HM}$$

On parle de force axifuge (et pas centrifuge) puisqu'elle fuit un axe (et non un point).

Alors en un point M de la surface de la Terre (latitude λ), la force d'inertie d'entraînement est

$$\mathbf{F}_{ie} = m\omega^2 R_T \cos \lambda \mathbf{e}_u$$

. On définit le poids avec un pendule à l'équilibre tel que la tension compense le poids. Ainsi, le poids contient bien le terme d'attraction gravitationnel terrestre ais aussi la force d'inertie :

$$\mathbf{P} = m\mathbf{G}_T(M) + m\omega^2\mathbf{HM}$$

On peut alors définir un nouveau champ de pesanteur

$$\mathbf{g}(M) = \mathbf{G}_T(M) + \omega^2\mathbf{HM}$$

Avec $\omega^2 R_T = 3.4 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ donc on est loin des $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ que l'on connaît bien. Ainsi, l'influence de cette nouvelle force est bien souvent négligée. On peut calculer l'angle de correction entre \mathbf{G} et le nouveau champ \mathbf{g} 🚩 *Brébec p.214* :

$$\sin \alpha = \frac{\omega^2 R_t \sin 2\lambda}{2g} \implies \alpha \sim 1.73 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 6'$$

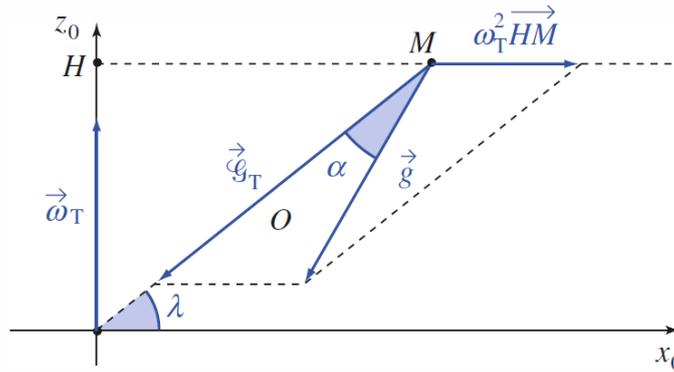


FIGURE 2.2 – Schéma de l'angle de correction apportée par le force d'inertie d'entraînement

Effet de l'altitude

Si on monte dans l'atmosphère, la force axifuge augmente alors que la gravité diminue... Ainsi on calcule :

$$\frac{g(h) - g(0)}{g(0)} = 2 \frac{h}{R_T}$$

Pour 0.5% il faut se placer à 16km de haut.

2.2 Forme de la terre

Dessiner le champ de force au tableau à la surface de la Terre ajouter le champ gravitationnel (toujours pour la surface uniquement !) et ainsi montrer qu'aux pôles, la résultante est une force qui écrase vers le centre tandis qu'à l'équateur, la force de gravité est allégée par la force axifuge.

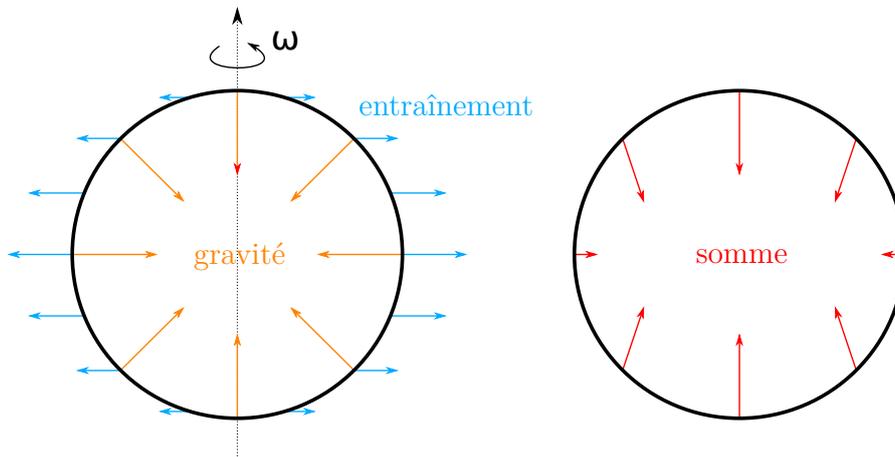


FIGURE 2.3 – Forme du champ de gravité à la surface de la Terre. La composante axifuge est volontairement accentuée.

Attention ce que je fais là, c'est sorti un peu de ma tête donc pas sûr que ce soit ouf... L'idée c'est d'avoir un OdG pour l'applatissage. On comprend ainsi que la Terre prenne une forme plutôt écrasée au niveau des pôles : ça pousse plus fort au pôles... Mais qu'est ce qui fait que la forme est bien ainsi ? Et bien en tout point de la Terre (intérieur), s'exerce trois forces qui se compensent :

- attraction gravitationnelle vers le centre
- force d'inertie d'entraînement

— force de pression qui compense les deux précédentes

La loi de l'hydrostatique peut donc s'écrire

$$P = -\frac{4}{3}\pi\rho^2\mathcal{G}\mathbf{OM} + \rho\omega^2\mathbf{HM}$$

On a appliqué le théorème de GAUSS pour la forme du champ dans la Terre :

$$\rho\mathbf{G} = \rho\frac{4}{3}\pi\rho\mathcal{G}\mathbf{MO}$$

Étudions en particulier ce gradient selon deux axes :

— Dans la direction de l'axe de rotation, la force d'entraînement ne joue aucun rôle $\mathbf{HM} = \mathbf{0}$ donc le gradient est maximal

$$(\nabla P)_{max} = \frac{4}{3}\pi\rho^2\mathcal{G}r$$

— Dans la direction perpendiculaire, dans le plan de l'équateur, le gradient est atténué :

$$(\nabla P)_{min} = \frac{4}{3}\pi\rho^2\mathcal{G}r - \rho\omega^2r$$

Ainsi la variation relative de ces gradients est

$$\frac{(\nabla P)_{max}}{(\nabla P)_{min}} = \frac{4/3\pi\rho\mathcal{G}}{4/3\pi\rho\mathcal{G} - \omega^2} \sim 1 + 3.5 \cdot 10^{-3}$$

On a pris $\rho = M/V = 5.515 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, comme masse volumique moyenne (évidemment c'est claqué parce que la masse volumique augmente avec la profondeur mais bon...). En notant $\Delta P = P_{surface} - P_{centre}$, on a

$$\nabla P \sim \frac{\Delta P}{R} \implies \frac{(\nabla P)_{max}}{(\nabla P)_{min}} = \frac{R_{max}}{R_{min}} \implies R_{max} - R_{min} = R_T \frac{(\nabla P)_{max}}{(\nabla P)_{min}}$$

On trouve alors $R_{max} - R_{min} = R_{equateur} - R_{poles} = 22 \text{ km}$.

Résumé

On peut aussi ne pas faire tout ça et juste dire qu'en gros la variation relative des rayons est liée à la variation relative des forces :

$$\frac{R_{max} - R_{min}}{R_T} = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{moy}} = \frac{R_T\omega^2}{g}$$

Et on retrouve plus vite le résultat. Le lien linéaire entre ces deux variations relatives est justifié par le fait que ce sont de faibles variations.

3 Mouvement dans le référentiel terrestre

3.1 Pendule de FOUCAULT

↪ Brebec, p. 215 tous les calculs sont dedans, on invente rien

↪ Poly de **JRS**

↪ Une vidéo magnifique

↪ Site Larousse

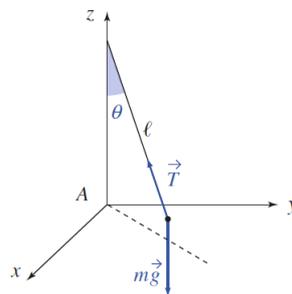
↪ J'intègre, p. 73, exo 2.8

Petit point histoire

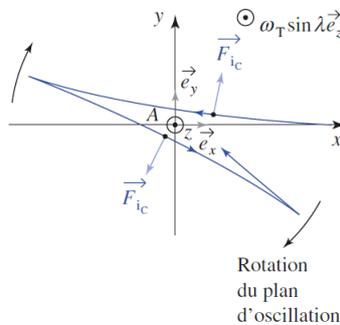
Expérience historique de FOUCAULT de 1851 (d'abord dans sa cave le 3 Janvier puis au Panthéon le 18 Mars). Au Panthéon le pendule fait 67 mètres de haut, 30 kg pour la masse et Paris est à une latitude de $\lambda = 48^\circ 50'$. La direction d'oscillation du pendule pivote d'environ 11° par heure.

Comme le mouvement d'oscillation du pendule est uniquement dû à son poids, sa direction d'oscillation est indépendante de la rotation de la terre. Du coup si la direction semble bouger c'est que c'est la table qui tourne et donc la terre qui tourne sur elle-même ! :o C'est la première preuve expérimentale de la rotation de la terre et elle date de 1851. Et donc, c'est aussi une preuve du caractère non-galiléen du référentiel terrestre.

Pour le voir, essayons d'expliquer son mouvement dans le référentiel terrestre en le supposant galiléen (spoiler alert ça marche pas) ➤ *Brebec, p. 215* .



Le pendule en mouvement.



Déviation (numériquement exagérée) du pendule, pour une expérience dans l'hémisphère Nord.

Donc comme ça marche pas, prenons en compte la force de Coriolis ! Et incroyable ça marche super bien !

On finit alors avec des OdG.

Autre méthode sans calculs

Très inspirée de cette vidéo... L'idée est de calculer l'angle de rotation de la direction Nord en fonction de la rotation de la Terre. Considérons un point fixe à la surface du globe (genre une ville), après un temps dt , celle-ci a avancé de dx vers l'est. On peut calculer dx de deux manières :

À partir de la rotation de la Terre On note $l_1 = R_T \cos \lambda$ la distance à l'axe

de rotation. Alors

$$dx = l_1 \omega_T dt$$

À partir de la rotation de la direction Nord On se sert du point d'intersection entre la droite vers le Nord et l'axe de rotation de la Terre. Notons l_2 la distance entre ce point et la ville. Alors la direction Nord a tourné d'un angle $\omega_F dt$ (F pour FOUCAULT) tel que

$$dx = l_2 \omega_F dt$$

Ainsi on montre que le sol tourne sous le pendule à une pulsation

$$\omega_F = \frac{l_1}{l_2} \omega_T = \sin \lambda \omega_T$$

Et voilà, on a le bon résultat sans s'être trop fait chié avec des calculs de mort.

3.2 Déviation vers l'est

♣ *Brebec, p. 215* tous les calculs sont dedans, on invente rien

♣ *Poly de JRS*

♣ *J'intègre, p.72, exo 2.7*

On regarde ce phénomène d'un point de vue qualitatif (tiré du ♣ *Poly de JRS*) :

Ce constat a été effectué en 1833 par l'allemand Ferdinand REICH qui a mesuré une déviation vers l'Est de 28mm pour une masse tombant dans un puits de mine sur la hauteur $h = 158\text{m}$. Cet écart de 28mm a été mesuré par rapport au point d'impact qui aurait été obtenu si la masse en chute libre avait été suivi la verticale locale.

L'étude de cette chute s'effectue dans le référentiel terrestre non galiléen \mathcal{R} . On néglige les frottements exercés par l'air. L'équation du mouvement du corps en chute libre est donc :

$$m\vec{a}_{M/R} = m\vec{g} - 2m\vec{\Omega} \wedge \vec{v}_{M/R}$$

. Ici, nous nous contenterons d'une approche qualitative. Dans un cas comme dans l'autre, on est amené à faire des approximations tout à fait raisonnables puisque la force de Coniolis est faible devant le poids. On considère que le champ de pesanteur \vec{g} se situe selon $-\vec{e}_r$, l'angle entre sa direction réelle et $-\vec{e}_r$ étant vraiment faible comme on l'a vu avant. On considère que la vitesse du mobile en chute libre est donc orientée selon \vec{e}_r , voir le schéma de la figure 4 La situation est donc la suivante : $\vec{g} = -g\vec{e}_r$, $\vec{v} = -v\vec{e}_r$ et $\vec{\Omega} = \Omega (\sin \lambda \vec{e}_r - \cos \lambda \vec{e}_\theta)$. Le produit vectoriel représentant la force de Coriolis est donc :

$$\vec{F}_{Cor} = -2m\Omega (\sin \lambda \vec{e}_r - \cos \lambda \vec{e}_\theta) \wedge (-v)\vec{e}_r = 2m\Omega v \cos \lambda \vec{e}_\varphi$$

Cette force est bien orientée vers l'Est (sens de $+\vec{e}_\varphi$) comme cela a été vérifié par Reich. Si l'on effectue un raisonnement un point moins approché, on peut mettre en évidence un second effet de la force de Coriolis. Il se produit une légère déviation vers le Sud. Les ordres de grandeurs des deux déviations ne sont pas les mêmes. La déviation vers l'Est est de l'ordre du centimètre alors que celle vers le Sud est de l'ordre du micromètre.

L'exo du ♣ *J'intègre, p.72, exo 2.7* est vachement bien aussi, à voir lequel on préfère.

Avec les mains

L'objet par avec la vitesse de rotation de la Terre. En tombant, il garde cette vitesse de rotation mais sa distance au centre de la Terre diminue, donc il avance plus vite que le sol! Bien expliqué ici :

<https://youtu.be/KiJ9xr8GI>

3.3 Vents géostrophiques

⚡ *Cap Prépa, p.320* oui mais lequel ?

⚡ *Poly de JRS*

⚡ *ça*

Faire plutôt en cylindriques ($\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta$)

Sur Terre, trois termes désignent le même phénomène même si les situations ne sont jamais strictement équivalentes. Le terme cyclone est le terme générique qui devient un ouragan lorsqu'il se produit dans l'Atlantique Nord ou dans le Pacifique Nord-Est. En Asie de l'Est, on parle de typhon. Dans les autres océans, on utilise plutôt le terme cyclone. Les cyclones prennent naissance dans les océans de la zone intertropicale à la faveur d'une température de l'eau élevée qui favorise la formation de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La force de Coriolis explique le sens de rotation des ces immenses systèmes dépressionnaires.

Appliquons NS à un ouragan (écoulement incompressible) (comme effectué dans le ⚡ *Poly de JRS*)



FIGURE 3.1 – **Ouragan Katrina** - 2005, océan Atlantique Nord

$$\mu \frac{D\vec{v}}{Dt} = \mu \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}) \vec{v} \right) = \mu \vec{g} - \overrightarrow{grad} P + \eta \Delta \vec{v} - 2\mu \vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

Pour expliquer le sens de rotation des cyclones, notre attention ne sera portée que sur deux des termes de cette équation : celui des forces de pression et celui de la force de Coriolis.

Cela revient à considérer un écoulement stationnaire, incompressible et parfait (avec $\text{askip } \text{Re} = 10^{13}$).

On travaille dans le plan horizontal local à proximité du point M centre du cyclone. Ce plan sera assimilé au plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ de nos représentations précédentes de la Terre (FIGURE 2.1). Dans un cyclone, la pression au centre du cyclone - dans l'œil du cyclone - est faible comparativement à la pression sur les bords. Le gradient de pression est donc orienté vers l'extérieur et son opposé $-\overrightarrow{grad} P$ vers l'intérieur. Ce constat explique que la vitesse des vents est orientée vers le centre. Plaçons-nous sur le méridien passant par le point M , un peu au Sud de celui-ci. D'après ce que nous venons de dire, nous avons $\vec{v} = -v\vec{e}_\theta$, donc de l'air qui va du Sud vers le Nord Nous allons évaluer la force de Coriolis qui agit sur le fluide :

$$-2\mu \vec{\Omega} \wedge \vec{v} = -2\mu \Omega (\sin \lambda \vec{e}_r - \cos \lambda \vec{e}_\theta) \wedge (-v)\vec{e}_\theta = 2\mu \Omega \sin \lambda v \vec{e}_\varphi$$

La force de Coriolis est orientée selon le vecteur unitaire \vec{e}_φ , elle provoque la rotation du fluide dans le cyclone dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ce calcul a été mené pour une vitesse particulière, théoriquement il faut le faire pour chaque direction de vitesse pour conclure. Après ce calcul on peut passer à l'explication de dIS !



FIGURE 3.2 – **Ouragan Irma** - 2017, océan Atlantique Nord



FIGURE 3.3 – **Ouragan Michael** - 2018, océan Atlantique Nord

CdIS

On peut le faire rapidement avec la règle de la main droite... On projette la force de CORIOLIS dans le plan horizontal :

$$\mathbf{F}_{ich} = 2m\omega_T \sin \lambda \mathbf{v} \times \mathbf{e}_z$$

Avec \mathbf{e}_z la verticale. Ainsi cette force pousse toujours vers la droite du mouvement quand on est dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. Imaginons alors un point de dépression, le fluide y est attiré. Il commence alors à tourner autour dans le sens trigonométrique (hémisphère Nord), en régime stationnaire, il y a un équilibre entre CORIOLIS qui pousse hors du cercle et la gradient de pression qui tire vers l'intérieur.

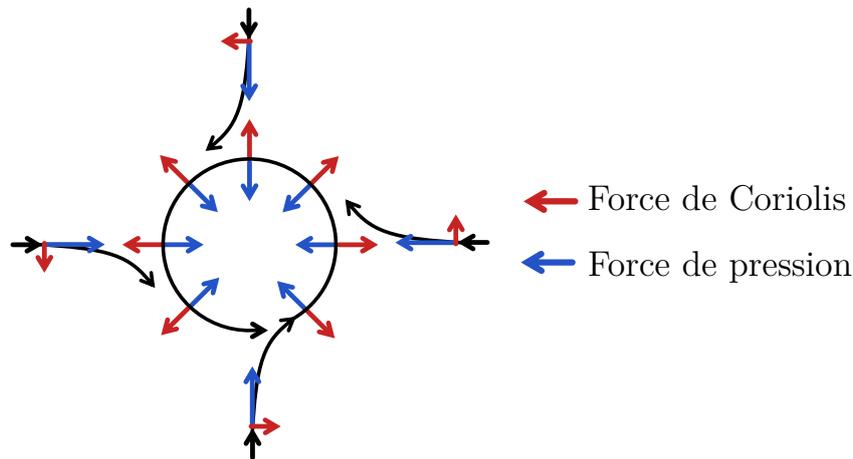


FIGURE 3.4 – Vents géostrophiques dans l'hémisphère Nord autour d'une dépression.

Après c'est compliqué de dire si ça spirale vers l'intérieur ou l'extérieur... Faut comparer les deux forces. Quand on observe les cartes en direct, on remarque que ça spirale généralement vers l'intérieur :

<https://fr.windfinder.com/3/49.5042/9.5421/report>

<https://earth.nullschool.net/fr/>

Attention

L'explication repose sur un état transitoire, mais une fois le régime permanent établi, le mouvement des particules est à orbite constante donc elles ne se déplacent plus des hautes pressions vers les basses pressions !

Qu'est ce que le référentiel de Kepler ? Quel est son mouvement par rapport au référentiel de Copernic ?

Quelle est la définition d'un référentiel ?

Donne des exemples concrets de l'application des forces d'inerties d'entraînement et de Coriolis. Est ce que ce sont des "vraies" forces ? Qu'est ce qui les différencie des vraies forces ?

La description statique des marées est-elle suffisante ? (temps de réponse, résonance...)

Comment expliquer les marées de plus de 20 m (Mont saint michel, fundi...) alors que tu donnes des ordres de grandeur pour les marées de l'ordre de 1m ?

Les marées existent seulement pour les liquides ? Qu'est ce que la limite de Roche ?

Pourquoi la lune présente toujours la même face à la terre ?

Précisions : que se passe-t-il si on tire un boulet de canon dans l'hémisphère nord ? Et dans l'hémisphère sud ?

Qu'est-ce que c'est qu'un référentiel ?

Un point et un système de trois axes (+ un axe de temps et relativité restreinte)

Qu'est ce que c'est qu'un référentiel galiléen ?

Un référentiel dans lequel les lois de NEWTON s'appliquent

Que dit le premier principe de la dynamique ?

Il existe un référentiel galiléen (corollaire, il en existe une infinité)

Comment en pratique on construit-on un référentiel galiléen ?

Si on remarque des forces parasites dans une expérience, on se pose des questions.

Quelle expérience on fait en métrologie pour construire un référentiel galiléen ?

Écart au mouvement du gyroscope, on soustrait les déviations systématiques et on re-construit un référentiel galiléen.

Différence entre masse inertielle et masse gravitationnelle ? Pourquoi je pose cette question dans cette leçon ?

Masse inertielle dans le PFD, masse gravitationnelle dans la force gravitationnelle. Ces quantités ont été montrées égales par l'expérience (balance d'EÖDVÖS). En vrai elles sont proportionnelles et on fout la constante de proportionnalité dans \mathcal{G} .

Tu connais des systèmes dans lesquels le terme en $\frac{d\omega}{dt}$ doit être pris en compte ?

Précession d'un axe de rotation propre d'un gyroscope.

À quoi est associé le terme de CORIOLIS ? Loi de conservation fondamentale ?

Conservation du moment cinétique (Coriolis + terme d'Euler en $\frac{d\omega}{dt}$). On peut réinterpréter le patineur qui serre les bras en termes de ces pseudo-forces.

Tu t'assois en face de quelqu'un d'autre, tu tournes sur toi-même. Quel est le mouvement de l'autre dans ton référentiel ? Qu'est-ce qui maintient ce mouvement orbital (pourquoi la force centrifuge l'expulse pas ?)

Translation circulaire, force de CORIOLIS compense centrifuge, pour l'orbite qui correspond à la distance !

Quelle hypothèse pour $\omega \times \omega \times OM$?

Rotation uniforme.

Conséquence de la non-verticalité du champ de pesanteur local ?

En architecture, pour les grands ouvrages on prend la verticale définie avec le fil à plomb.

Champs de pesanteur implique forme de la Terre ?

Oui mais la réciproque aussi... Action réciproque !

Déviations de la chute libre et déviation du mouvement du pendule, quelle différence fondamentale ?

Déviations tangente ou normale à la surface terrestre, l'hémisphère n'a d'effet que pour le pendule de FOUCAULT. La déviation vers l'Est, elle, est toujours vers l'Est.

Contrainte expérimentale du pendule ?

Méthode du fil brûlé pour lui donner le moins de vitesse initiale, mais sinon ça marche à peu près dans une salle de classe avec un grand plafond.

Pour les mouvements atmosphériques "les particules d'air se déplacent des hautes pressions vers les basses pressions"... C'est vrai ça ?

Le lavabo...

BULLSHIT ! Bon à part que y a des gens qui se sont amusés à créer un lavabo idéal et alors ça marche même pas vraiment :(

Quelles conséquences des marées sur le système Terre-Lune ?

Éloignement de la Lune, ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même, face visible de la Lune. Les forces de marées exercent un couple sur un système dissipatif donc perte d'énergie, mais avec conservation du moment cinétique global, la Lune s'éloigne (conversion de l'énergie de rotation de la Lune par une énergie potentielle orbitale). Dissipation due aux couches magmatiques (c'est pas l'eau qui frotte sur

la Terre).

Condition pour avoir un référentiel galiléen = condition sur l'échelle de temps seulement ?

Non, y a aussi des échelles de distance (entraînement) ou de vitesse (CORIOLIS)

Qu'est-ce que ça soutendrait s'il n'existait pas de référentiel galiléen ?

Dans ce cas l'espace n'est pas Euclidien.

Quadrupôle gravitationnel...

Le terme en $1/r$ correspond à la géométrie sphérique, pas de $1/r^2$ (terme dipolaire) car pas de masse négative, donc l'écart à la géométrie sphérique est donné par un terme quadrupolaire (en $1/r^3$).

Tu peux définir un ref galiléen ?

Dans lequel s'appliquent les lois de Newton

Dans certaines conditions géocentriques pas galiléen, précise

On en a besoin pour expliquer les marées

Mouvement de la Terre dan Copernic

Ellipse avec le Soleil à un foyer, c'est une translation

Sur quelles échelles de temps on considère qu'on est galiléen ?

Terrestre en dessous de l'heure, géocentrique en dessous de la saison, Copernic 200 000 ans

Marées journalières ?

Oui mais l'amplitude de la marée varie sur une échelle de temps plus grande

Pendule de Foucault, quand ?

1851

Parallèle de Coriolis avec l'élec ?

Laplace, effet Hall

Impact de la déviation vers l'est

Missile balistiques (la Grosse Bertha de la WWII)

Nombre sans dimension qui mesure l'impact de Coriolis

Coriolis sur convectif nb de Rossby c'est l'inverse. Coriolis négligeable dans les lavabos

Terme de marées ?

Champ de pesanteur en l'origine - champ de pesanteur en M

Quelles pseudo-forces en relativité ?

La gravité qui déforme l'espace-temps

Commentaires

- Bien d'aller chercher des vidéos, du contexte... Aller chercher les vents atmosphériques sur des sites officiel de météo
[https://fr.windfinder.com/3/49.5042/9.5421!](https://fr.windfinder.com/3/49.5042/9.5421)
- Au début, prendre juste un peu de temps pour reposer les notions (référentiel, référentiel galiléen...)
- Quand on parle des principes de NEWTON, parler du concept d'interaction : sans interaction, le système est isolé donc mouvement rectiligne uniforme
- Mettre en lumière la différence entre déviation vers l'Est et pendule de FOUCAULT (pas de déviation vers l'Ouest dans l'hémisphère sud haha)