LP03 : Caractère non galiléen du référentiel terrestre.

- Niveau : Licence -Prérequis : Interac° gravitationnelle, méca Newtonienne, Chgmt de ref.

Intro : On a vu les changements de référentiels, si un ref n'est pas galiléen, le plus simple est de faire apparaître les 2 forces d'inerties (entraînement et Coriolis). On (re)définit un référentiel Galiléen pour fixer l'étude, puis on définit le référentiel terrestre. Celui n'a aucune raison d'être Galiléen. (D'ailleurs 1831, Reich montre la déviation vers l'est (chute de bille).

Cette leçon va chercher à : montrer pourquoi, montrer les effets, montrer quand il peut l'être. C'est aussi une bonne occasion de faire passer le message : un effet n'est jamais négligeable tout court, il l'est toujours sous certaines conditions. (Phrase de Melzani).

I - PFD dans un référentiel non Galiléen.

1) Référentiels d'études

Au cours de la leçon, on va avoir besoin de différents référentiels. Portelli pour les def.
Présenter (avec schéma) :

1. Référentiel de Copernic R_c: centré sur le centre de masse S du système solaire, axes pointant vers des étoiles fixes. (Rq : il y a aussi le référentiel héliocentrique centré sur le Soleil. On les confond dans la leçon) On le suppose galiléen dans la suite (voir Questions).
2. Référentiel géocentrique R_o: centré sur le centre de masse de la Terre T, axes parallèles à ceux du référentiel de Copernic. (Rq : pas de force de Coriolis car il est en translation circulaire par rapport au précédent.)
3. Référentiel terrestre R_t: lié à la Terre. La Terre ne tourne pas dans ce référentiel, qui suit la rotation.

Remarques sur les mouvements de la Terre :

- Ro/Rc : Mouvement de translation elliptique, e=0.017, donc ≃ circulaire.
  d(ST) = $1{,}5\times10^{11}$ m, T_{orb} = 365,25 jours
- Rt/Rc : rotation à ω_T à peu près constante, $T_{sidéral}$ = 86164s donc $\omega_T \simeq 7{,}3\times10^{-5}$ rad/s. On a un angle d'environ 23 degrés entre les deux axes de rotations.

2) PFD dans le référentiel terrestre.

On va effectuer le PFD sur un point M de masse m dans R_t, pour voir tous les termes qui entrent en jeu.

Quelques notations

- $\vec{g_i}(M)$: Champ de gravita° de l'astre i sur M
- D_i = distance entre l'astre i et la Terre T.
- M_i = masse de l'astre i
- $\vec{F_a}$ forces autres que celles de gravités

PFD $m\vec{a}(M)_{/\mathcal{R}_T} = \vec{F_a} + m\,\vec{g_T}(M) + m\sum_{i=1}^{N}\vec{g_i}(M) - m\vec{a_e} - m\vec{a_c}$

On rappelle : $\vec{a_e} = \vec{a}(T)_{/\mathcal{R}_c} + \vec{\omega}\wedge\vec{\omega}\wedge\vec{TM}$ et $\vec{a_c} = 2\vec{\omega}\wedge\underbrace{\vec{v_r}(M)/\mathcal{R}_T}_{\text{vitesse relative }/\mathcal{R}_T}$

On obtient :

$$m\vec{a}(M)_{/\mathcal{R}_T} = \vec{F_a}\overbrace{-2\vec{\omega}\wedge v_M/\mathcal{R}_T}^{\text{Coriolis}} + \overbrace{m[\vec{g_T}(M) - \vec{\omega}\wedge\vec{\omega}\wedge\vec{TM}]}^{=\text{Poids (Terre)}}$$
$$+ m\underbrace{\left(\sum_{i=1}^{N}\vec{g_i} - \vec{a}(T)_{/\mathcal{R}_c}\right)}_{\text{Terme de marées}}$$

On va revenir sur ces différents termes dans la suite. !!!Manque un m dans coriolis!!!

II - Effet de la translation circulaire de Rt : les marées

Dans le terme précédent, un terme de marée, qui ne prend pas en compte la rotation de la Terre sur elle même. On va s'intéresser à ce terme en se plaçant dans cette partie dans le référentiel de Copernic. On fait dans la suite l'hypothèse que les astres (dont la Terre) sont assimilable à des corps de géométrie sphérique.

1) Expression simplifiée du terme de marée.

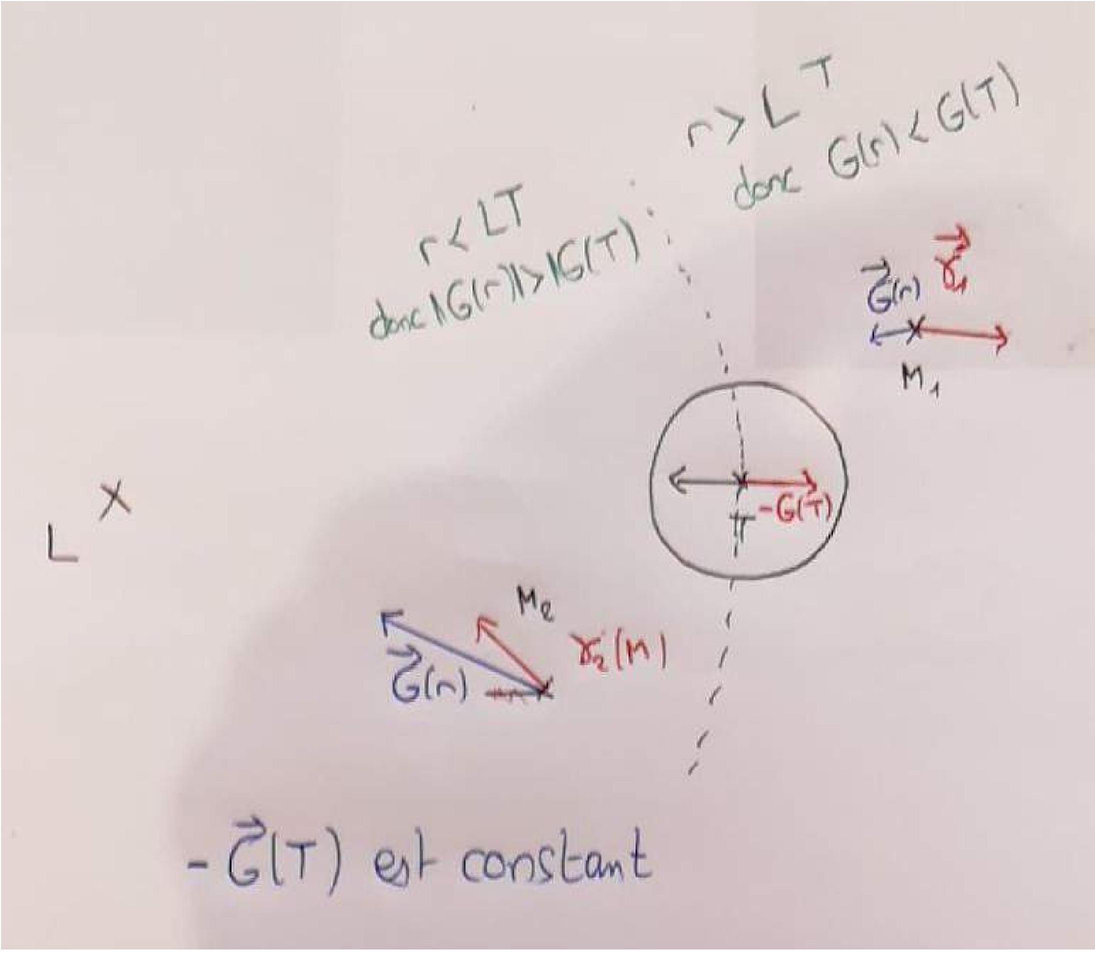
Si on applique le PFD à la Terre dans le référentiel de Copernic (considéré Galiléen) :

$$M_T\,\mathbf{a}(T)_{/Rc} = M_T\sum_{i=1}^{N}\mathbf{G}_i(T)$$

On obtient donc une expression pour l'accélération présente dans le terme de marée présenté précédemment, en remplaçant, on trouve que le terme de marée (ou terme différentiel) vaut (on l'appelle $\boldsymbol{\gamma}$) :

$$\boldsymbol{\gamma}(M) = \sum_{i=1}^{N}\mathbf{G}_i(M)-\mathbf{G}_i(T)$$

Analyse graphique de ce terme dans le cas de la Terre avec un seul astre : diapo
(il peut être bien de faire au moins une construction vectorielle au tableau pour expliquer).



Cherchons maintenant à calculer un ordre de grandeur de ce terme, ce qui est utile notamment si on veut savoir s'il est négligeable devant d'autres termes.

$$|\gamma| = |\mathbf{G}_i(M) - \mathbf{G}_i(T)| \simeq \frac{Gm_i}{(D_i - d)^2} - \frac{Gm_i}{D_i^{\ 2}} = \frac{Gm_i 2d}{D_i^3} \quad \textit{(DL à la fin)}$$

Diapo calcul de différente valeur (d~Rt pour un objet proche de la surface de la Terre) . On souligne l'importance du poids, mais surtout de la distance. Bien plus faible pour tous les autres astres.

2) Théorie statique qualitative des marées.

On prend ici un modèle très simplifié ou la Terre ne tourne pas sur elle-même et où elle est est recouverte uniformément d'une couche d'eau au repos.
Animation qui explique l'effet des marées en ne considérant que l'effet du terme de marée lunaire.

En considérant de plus le terme solaire, on explique les marées de vives-eau/mortes-eau.

Bonne vidéo : https://www.youtube.com/watch?v=vQ7GFSvAkcg

III - Effets de la rotation du référentiel terrestre Rt

On va maintenant regarder le terme de pesanteur, qui semble modifier le poids par rapport à la définition qu'on utilise d'habitude.

1) Poids d'un corps et champ de pesanteur terrestre

Soit un point M en équilibre dans Rt (donc pas de force de Coriolis). On définit le poids comme étant la force proportionnelle à la masse (H projeté de M sur l'axe de rotation) :

$$\mathbf{P} = m[\mathbf{G}_t(M) - \boldsymbol{\omega}_T \wedge \boldsymbol{\omega}_T \wedge \mathbf{HM} + \boldsymbol{\gamma}]$$

Le terme des marées va ici être négligé, on l'a déjà étudié précédemment. Le terme restant dans les crochets correspond au **g** que l'on mesure.
Calculons (en ordre de grandeur) l'erreur que l'on fait si on ne considère pas le terme en ω^2. (Faire un petit schéma avec les vecteurs pour bien comprendre).
Au maximum, à la surface de la terre on a HM = $R_T \simeq 6300$ km, donc :
Terme en $\omega^2 \simeq 0{,}034$ m/s² alors que $\mathbf{G}_t = g_0 \simeq 9{,}8$ m/s², on a une erreur inférieur à 0,5%.

Ce terme là n'est pas très important pour nous.

2) Influence de la force de Coriolis

Comparons la force de Coriolis (en Ordre de Grandeur) avec le poids :

$$\left|\frac{F_{ic}}{mg_0}\right| = \frac{2\omega_T v_r}{g_0} = \frac{v_r}{6{,}7.10^4}$$

Donc pour avoir une variation supérieur à 0,5 %, il faut $v_r > 350$m/s soit 1250 km/h.
Laurence avait du finir sa présentation ici (fin du temps), elle a conclu, mais elle a pu développer pendant les questions sur la méthode perturbative pour étudier l'influence de la force de Coriolis, et donc calculer la déviation vers l'est attendue, qui correspond bien à l'expérience de Reich (2,8 cm pour une bille qui chute de 158 m à la la latitude λ = 50°). Démonstration bien rédigée dans la partie "Déviation vers l'est" de cette page : https://femto-physique.fr/mecanique/dynamique-terrestre.php

CCL: Pour des échelles de temps et de distance courte, on peut considérer que le référentiel terrestre est à peu près Galiléen. Néanmoins, certains phénomènes (déviation de la bille ou marée présentées ici, ou pendule de Foucault historiquement) montre que cela n'est qu'une approximation, et qu'il faut donc y faire attention.

Questions:

- Autre phénomène ? Cyclones et anticyclones, avec sens de rotation. Sous l'effet de la force de Coriolis, ces vents sont déviés vers la droite dans l'hémisphère nord (gauche dans

celle du sud) ce qui donne une rotation de l'air autour du centre de basse pression. Ainsi les cyclones auront des sens de rotation différents selon l'hémisphère : dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens horaire dans l'hémisphère sud. Comme la force de Coriolis est nulle à l'équateur et augmente en se dirigeant vers les pôles, la rotation ne peut être induite en général qu'à des latitudes de plus de 5 à 10 degrés. On ne retrouve donc pas de cyclones près de l'équateur.
- A partir de quand s'est-on intéressé au fait que la terre tourne ou non ? 1728 avec découverte de l'aberration des étoiles, avant on supposait, après on était sur!
-Comment est reliée la période de rotation du pendule de Foucault à la période de rotation de la terre ?
https://www.science.lu/fr/le-pendule-foucault/comment-montre-t-il-que-terre-tourne#:~:text=L'exp%C3%A9rience%20de%20L%C3%A9on%20Foucault&text=Si%20on%20le%20lance%20dans,Terre%20tourne%20sur%20elle%2Dm%C3%AAme.
- Citer d'autres conséquences des termes de marées autre que les marées océaniques. Elle déforme le manteau terrestre et cette déformation provoque une modification de la vitesse de rotation de la Terre. Et sur d'autres astres ? Les termes de marées peuvent être suffisamment fort pour entraîner la destruction d'un satellite. À quelle condition peut-il y avoir destruction ? Faut-il être proche ou loin ? On m'a fait aborder et expliquer la limite de Roche. La limite de Roche est la distance théorique en dessous de laquelle un satellite commencerait à se disloquer sous l'action des forces de marée causées par le corps céleste autour duquel il orbite, ces forces dépassant la cohésion interne du satellite.
https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Roche#:~:text=La%20limite%20de%20Roche%20est,la%20coh%C3%A9sion%20interne%20du%20satellite.