

LP03 - Caractère non-galiléen du référentiel terrestre

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Résumé

Bibliographie

- Mécanique MPSI/PCSI : 1re année : cours et exercices, *Brasselet, Pascal*, 2000
- La physique par la pratique, *Barthes, Julien and Portelli, Baptiste*, 2005
- La physique par la pratique, *Gruber, Christian and Benoit, Willy*, 1998

Pré-requis : Niveau L2

- Mécanique du point
- Changement de référentiel
- Champ gravitationnel

Table des matières

1	Le référentiel terrestre	2
1.1	Identification d'un référentiel galiléen	2
1.2	Dynamique dans le référentiel terrestre	3
2	Influence sur la Terre	3
2.1	Prédiction de la forme de la Terre	3
2.2	Champ gravitationnel et champ de pesanteur	4
3	Conséquences expérimentales	4
3.1	Pendule de Foucault	4
3.2	Mouvements atmosphériques	4
3.3	Quelle influence sur l'expérience ?	4

Introduction

Bien préciser que les systèmes considérés sont de faible masse devant la Terre, donc force de gravité entre ces deux objets négligeables.

Le référentiel terrestre est celui dans lequel nous décrivons les phénomènes physiques et est souvent considéré comme galiléen. C'est en effet la condition nécessaire à l'applications des lois de Newton. Or, celui-ci est en rotation autour de l'axe Nord-Sud de la Terre, donc il n'est pas galiléen.

Comme nous l'avons vu dans le cours précédent traitant des référentiels non-galiléens, cela induit des forces d'inertie. Comment cela peut-il être en accord avec la mécanique établie depuis le lycée? Les prédictions physiques que nous réalisons avant ne sont-elles plus valables?

Ce cours aura pour but de définir les référentiels utiles pour décrire le référentiel terrestre ainsi que de comprendre en quoi la non-galiléanité a des conséquences significatives ou non sur l'expérience.

1 Le référentiel terrestre

On commence par le principe d'inertie, ce qui pose : « Pourquoi on a besoin de définir nos référentiels correctement ». "Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite à moins que quelque force n'agisse sur lui". Mais pour que ce principe d'inertie soit vrai, il faut des référentiels privilégiés : les réfs galiléens. Changement de référentiels suivant ce référentiel "absolu" nécessaires pour étudier la mécanique en référentiel non-galiléen.

C'est un bon moment pour définir ce qu'est un référentiel galiléen proprement : un référentiel galiléen est un référentiel vérifiant la seconde loi de Newton.

1.1 Identification d'un référentiel galiléen

ATTENTION : penser à dire que le référentiel est l'association d'un repère spatial et temporel. Ici, on est en non-relativiste, on considère le même repère temporel pour tous les repères et on s'intéressera principalement aux repères spatiaux.

-Référentiel terrestre : Celui que l'on connaît au quotidien. Non-galiléen. Mais on définit un repère non-galiléen par rapport à un autre repère galiléen -> Essayons d'en trouver un.

-Référentiel géocentrique : Centre de la Terre. Axes prend comme direction des étoiles lointaines + absence de rotation. Non-galiléen : translation elliptique par rapport au Soleil.

-Référentiel de Copernic : Prend les mêmes axes que le référentiel géocentrique et comme origine le centre de masse du système solaire. Pas de rotation et non-galiléen également : rotation autour du centre de la voie lactée. (différent du repère de Kepler qui prend comme origine le centre du Soleil)

⇒ **Comment considérer un réf. Galiléen?!** Tout est en mouvement dans l'univers, rien n'est galiléen → Il n'y a pas de raison que le réf de Copernic ne le soit. Faute de preuve expérimentale contraire, on va le supposer galiléen (dynamique des galaxies est négligée, on suppose les temps d'expérience très faibles devant les temps de révolution). La force du principe d'inertie est de supposer un référentiel galiléen et de regarder les autres référentiels par rapport à celui-ci.

- $T_C = 200$ millions d'années

- $T_G = 365,25$ jours
- $T_t = 23\text{h}56$

Toute notre mécanique est valable si $T_{exp} \ll T_G$. Maintenant qu'on a supposé ça, on remonte les référentiels.

Le réf. géocentrique : translation elliptique autour du Soleil, $T_G = 365,25$ jours. On a alors $T_{exp} \ll T_G \Rightarrow$ Mouvement en translation rectiligne uniforme (TRU).

\Rightarrow Jour sidéral/solaire. C'est peut-être mieux de juste évoquer qu'il y a une légère différence entre jour sidéral et jour solaire, mais qu'en ODG on a la même valeur pour Ω , au mieux on reviendra dessus avec un beau schéma dans les questions.

Et à cette non-galiléanité se superpose une autre pour passer au référentiel terrestre. On suppose que le référentiel géocentrique est galiléen afin de ne se préoccuper que du caractère non galiléen du référentiel terrestre à cause de sa rotation. Rotation de la Terre, vecteur oméga (ODG), beau schéma.

[« L'expérience de pensée de Einstein » est intéressante aussi, à voir dans le Brasselet $\Rightarrow R_g$ Référentiel galiléen si les champs gravitationnels des autres astres sont négligeables, car on peut négliger le terme de gravitation différentielle.]

1.2 Dynamique dans le référentiel terrestre

\rightarrow Les 4 **pseudo-forces** (plus simple que de parler d'accélération) résultantes du changement de référentiel (si on n'a pas envie de détailler, on peut passer aux forces en jeu directement). Dans notre cas, seules deux d'entre elles sont prises en compte.

Commentaire sur la force d'entraînement d'inertie : C'est une force qui n'a pas de réalité physique dans R' , le réf. non-galiléen. Elles traduisent l'inertie de l'objet dans R sous une certaine accélération. Disons que cette accélération a est celle de la main qui tire un pendule, son référentiel est R' . Dans R' , \vec{a} n'est plus présente dans les équations. La masse n'a aucune raison de se dévier de la verticale dans ce référentiel, mais elle le fait bien. Cette déviation est la manifestation de l'inertie dans le référentiel R . La perturbation de l'inertie dans R' se manifeste par cette force d'entraînement d'inertie. Illustration avec un pendule en direct.

2 Influence sur la Terre

On a les expressions des forces avec un système à $\vec{v} = \vec{0} \rightarrow$ Dessin des forces à la surface de la Terre (ω est bien orienté du sud vers le nord d'ailleurs) et expression simplifiée de $F_{ie}^{\vec{}}$

2.1 Prédiction de la forme de la Terre

On remarque que ces forces sont conservatives (écriture de l'énergie potentielle). Schéma de l'ellipsoïde + calcul (Calcul complet à partir de la variation d'énergie due à la rotation de la Terre dans Principles of Geophysics, Sleep Fujita, p.521. Nous on part sur un calcul d'ordre de grandeur, où l'on raisonne entre les pôles et l'Equateur.

On trouve l'aplatissement $\frac{R_{equateur} - R_{pole}}{R_{moyen}} = \frac{F_{equateur} - F_{pole}}{F_{moy}} \simeq \frac{\omega^2 R_{equateur}}{g} = \frac{1}{300}$. En prenant pour R_{moyen} le rayon de la Terre on trouve :

$R_{eq} = 6478$ km et $R_p = 6357$ km \Rightarrow Effet purement axifuge. (Cela va influencer le champ de pesanteur également, il ne faut pas considérer une Terre sphérique pour être rigoureux...)

2.2 Champ gravitationnel et champ de pesanteur

Définition du poids par la tension dans le fil tirant l'objet.

Calculs : définition du poids : $\vec{g} = -\mathcal{G} \frac{M_T}{R_T^2} \vec{e}_r + \omega^2 R_T \sin \lambda \vec{u}$ (\vec{u} axifuge). Une formule de g est envisageable. \rightarrow Variation de $g = 9.83m/s^2$ aux pôles à $9.78m/s^2$ à l'équateur \rightarrow On considère $g = 9.8m/s^2$ constant à la surface de la Terre, avec 0.35% d'erreur. (à moitié dûe à la rotation de la Terre, à moitié dûe à la forme nouvelle de la Terre qui modifie le champ de pesanteur de la sphère).

Application à l'orbite géostationnaire : PAS CONVENTIONNEL. On se place dans le plan équatorial. Bien poser le schéma et rappeler le réf. Une accélération nulle dans le référentiel terrestre revient à dire que le satellite fait toujours face à un point fixe sur Terre (même vitesse angulaire). On calcule R la distance au centre de la terre pour que $g = -\frac{\mathcal{G}M_T}{R^2} + R\omega^2 = 0 \Rightarrow z = 36000km$

(Sous-partie 1.3 sur les marées causées par la non-galiléanité du référentiel géocentrique est hors-sujet, ne pas faire).

3 Conséquences expérimentales

Redonner formule pour force de Coriolis. Expliquer son influence et **sa direction** (à droite de \vec{v} dans l'hémisphère nord). ODG \rightarrow faible en norme par rapport au poids, mais peut avoir des directions où c'est la seule force qui s'applique \rightarrow **Non-négligeable**.

3.1 Pendule de Foucault

https://www.youtube.com/watch?v=Fzrj_omw9Y4

Exemples historique de preuve de l'existence : Pendule de Foucault (1851, Panthéon à Paris, fil de 67m de long). Plus qu'une expérience sur Coriolis, elle a prouvé la rotation de la Terre! Détail pendule : on fait les calculs en suivant la démo p.493 du Gruber. On se place en cartésien car les coordonnées polaires ne sont pas préférées dues à la brisure de symétrie induite par Coriolis. Au moment d'obtenir le système où l'on pose $Z = x + iy$, on peut dire que l'on résout numériquement. $\dot{\theta} = \Omega \sin \lambda$.

Animation Python (Internet peut-être plus propre).

3.2 Mouvements atmosphériques

Partie potentiellement superflue.

Exemple des typhons : Explication avec les mains dans brassé à partir de p182 Dessins intéressants : équilibre pression/Coriolis = cercles ou bien : un anti-cyclone et une dépression l'une à côté de l'autre qui crée des spirales de fluide. (On peut également parler des alizés au niveau de l'Equateur)

Remarque : -calcul de la puissance des forces \rightarrow Coriolis ne travaille pas. $\vec{F} \cdot \vec{v} = 0$ (analogie avec la force de Lorentz magnétique)

3.3 Quelle influence sur l'expérience ?

Quand est-ce qu'on peut négliger Coriolis ? Quand on regarde sur un temps T_{exp} , on a des effets de Coriolis en $\frac{T_{exp}}{T}$:

$$L_c = a_c T_{exp}^2$$

$$a_c = \omega v_{exp} = \frac{1}{T} \frac{L_{exp}}{T_{exp}}$$

On en déduit :

$$L_{cor} = L_{exp} \frac{T_{exp}}{T} \quad (1)$$

(formule qui s'applique directement à la déviation vers l'est, même pas besoin de faire tous les calculs) \Rightarrow Si $T_{exp} \ll T$, Coriolis est négligeable. \rightarrow Pq il est dur de monter un pendule Foucault (1 tr = 24h au Pôle Nord. Idem pour tout phénomène lié à Coriolis).

Conclusion

Définition d'un repère galiléen pas si trivial, et le référentiel terrestre n'a rien de particulier qui le rendrait galiléen. Caractère non-galiléen = des conséquences subtiles qu'il faut garder à l'esprit. Différence champ pesanteur/champ de gravité notamment. Mais toutes nos expériences se déroulent généralement bien ($T_{exp} \ll T$) et celles mettant en avant la rotation de la Terre s'avèrent difficiles à mettre en place. Même si cela pose parfois problème (Tirs ballistiques par ex.).

Commentaire

Bon nombre d'applications et ODG bien menés (remarque : attention pour les notes parce qu'on ne peut pas les regarder pendant les questions du jury).

Bon choix d'avoir viré les marées (qui se rapporte plus au référentiel géocentrique).

Attention à bien dire que le référentiel géocentrique est en translation elliptique autour du Soleil (et non en rotation). Ça se voit parce que tous les points de la Terre ont la même vitesse dans le référentiel de Copernic.

Pendule de Foucault : donner les ODG de la taille de Foucault (67 m et 28kg) pour qu'on se rende compte que c'est pas un simple pendule simple (simple).

Il vaut mieux bien finir une partie comme il faut (le pendule de Foucault), que de vouloir faire à tout prix toutes ses sous-parties trop rapidement, et mentionner les parties non-abordées en conclusion pour lancer les questions.

Un mauvais BUP pour la culture : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=14553

Un autre intéressant mais un peu HS : http://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/article-bup.php?ID_fiche=22224

Questions posées

Quand est-ce qu'on a commencé à prendre en compte les effets de la non galiléanité ?

\rightarrow Existence de ces forces pour la déviation vers l'est

Les physiciens avaient-ils une autre approche pour expliquer les écarts entre théorie et expérience ?

→ Le terme de la force de Coriolis a longtemps été mis en doute, les observations expérimentales étant tellement faibles que la rotation de la Terre était remise en cause. C'est à partir de la moitié du XIX^{ème} siècle que la force de Coriolis est introduite et formalisée sous une forme similaire à celle utilisée actuellement.

Qu'est-ce que c'est un réf galiléen ?

→ C'est un réf dans lequel le principe d'inertie s'applique

Référentiel terrestre = 3 axes ?

→ Il faut aussi un axe de temps

Autre référentiel que celui de Copernic vs Kepler ?

→ Centre du repère : centre de masse vs centre du soleil

Quel serait le "meilleur" référentiel galiléen ?

→ Celui centré au centre de masse de l'univers

Qu'est-ce qu'on pourrait avoir de plus loin dans l'univers pour définir les axes ?

→ Fond diffus cosmologique

Préciser rotation du réf géocentrique par rapport au Soleil ?

→ non c'est une translation elliptique

Définir translation et rotation

→ Rotation "la trajectoire de tous ses points sont des cercles dont le centre est une même droite (axe de rotation)"

→ Translation "En cinématique, un solide indéformable est en mouvement de translation si tout segment joignant deux points du solide reste parallèle à lui-même au cours du mouvement" (wikipédia)

Est-ce que c'est vraiment important de différencier jour solaire et jour sidéral pour omega ?

→ Négligeable vu les chiffres significatifs

Exemple de phénomène qui montre que le réf géocentrique est non galiléen ?

→ Les marées : on calcule l'accélération du réf géo par rapport au réf copernic en faisant un PFD sur la Terre, puis on applique le PFD à un élément de l'océan dans le référentiel géocentrique

Le PFD est-il toujours vrai sous la forme $m\vec{a} = \vec{F}$?

→ Que si la masse est constante

Passage de Yohan Faure le 20/05

— C'est quoi un référentiel ? Ça se généralise comment avec la relat ?

— c'est quoi un réf galiléen ?

— Comment on fait pour avoir un réf galiléen en pratique ? Test avec un gyroscope

— Différence entre masse inertielle et masse grave ? Pourquoi c'est important dans cette leçon ? Quelle expérience nous montre leur égalité ?

— Terme en $\dot{\omega}$? Dans la pratique des systèmes dans lesquels ce terme là s'applique ?

— À quoi est associé le terme de Coriolis ? Est-ce qu'il est associé à une loi de conservation fondamentale ?

— Exercice de pensée : je tourne sur moi-même, quelle est la trajectoire d'une personne qui serait fixe devant moi (avant que je tourne) ? Qu'est-ce qui fait que la personne n'est pas éjectée par l'effet centrifuge ? c'est la force de Coriolis

— dans le terme des marées, est-ce que les deux termes sont indépendants ? Non pseudo-force change répartition de masse donc change interaction grave

- quelle hypothèse pour écrire $\omega \times (\omega \times r)$?
- Conséquence de la non verticalité du champ de pesanteur local ?
- quelle différence fondamentale entre la déviation vers l'est et le pendule de Foucault ? C'est que la déviation sera toujours vers l'est alors que le pendule change de sens selon l'hémisphère
- Réalisation pratique du pendule ? Fil brûlé pour lâcher le pendule sans lui donner d'énergie (rotation notamment)
- Quelle est la nature du mouvement des particules de fluides pour les vents géostrophiques ?
- Lavabo qui se vide ?
- lien entre translation elliptique est le forces de marées ?
- Quelles conséquences des marées sur le système Terre-Lune ?
- est-ce que les conditions sur les référentiels non galiléen sont uniquement temporelles ? Échelle de distance aussi (coriolis faire apparaître une vitesse)
- Qu'est-ce que ça voudrait dire qu'aucun référentiel galiléen n'existe ?
- <https://fr.windfinder.com/#3/49.5042/9.5421>
- ref = 3 axes + 1 horloge
- principe d'existence : il existe un ref galiléen
- pas de ref galiléen : sous-tend que l'univers n'est pas euclidien
- équivalence des masses : balance d'Eotvos
- Le gyroscope c'est un très bon outil pour tester la galiléenité
- terme d'euler : accélération angulaire dans un virage
- Coriolis + Euler correspond à la conservation du moment angulaire, cf Berkley
- direction de \vec{g} important pour l'architecture
-