

Titre : Manifestations du caractère non-galiléen d'un référentiel

Présentée par : Ludivine Émeric

Rapport écrit par : Marion Spir-Jacob

Correcteur : Alexis Bres

Date : 14/04/2021

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Physique tout-en-un première année	Sanz et co	Dunod
Mécanique, fondements et applications	Pérez	Dunod

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Prérequis : mécanique du point, force d'attraction gravitationnelle

Intro (1min30) : La Terre est en rotation sur elle-même, on peut le voir grâce aux photographies du ciel étoilé en pose longue (image sur slide). Mais outre les observations du ciel, comment pourrions-nous savoir que la Terre tourne ?

I. Référentiel non-galiléen

1.Principe d'inertie (4min)

Définition du principe d'inertie et d'un référentiel galiléen (un référentiel dans lequel le principe s'applique). PFD dans un référentiel galiléen R. Que devient ce PFD dans un référentiel non-galiléen R' ?

2.Changement de référentiel (8min)

Calcul de la loi de composition des vitesses et des accélérations. Définition de vitesse d'entraînement, accélération d'entraînement, accélération de Coriolis. Sur slide : cas particuliers d'une translation pure et d'une rotation pure.

II. Forces d'inertie

1. Interprétation (8min)

PFD dans R galiléen : $F = ma = m(a_r + a_e + a_c)$

Forces apparentes d'entraînement ($-ma_e$) et de Coriolis ($-ma_c$). Généralise le PFD dans un référentiel non-galiléen. Exemple d'une voiture qui accélère et d'un manège tournant avec un observateur extérieur et intérieur.

2. Exemples de référentiels (4min)

Définitions des référentiels : terrestre, géocentrique, héliocentrique et de Copernic, de plus en plus galiléen. Chaque référentiel est adapté à une échelle de temps et de distance.

III. Applications au référentiel terrestre

1. Force d'inertie d'entraînement (7min)

Étude de l'effet de la force d'inertie d'entraînement lié à la rotation de la Terre. Distinction pesanteur/gravité (différence : inertie d'entraînement).

2. Force de Coriolis (5min)

Étude du mouvement d'un pendule sur Terre. Cas galiléen : plan d'oscillations du pendule constant. Cas non-galiléen : à cause de la force d'inertie de Coriolis, le plan tourne. Calcul.

Conclusion : Vidéo du pendule de Foucault

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Question : À propos de la première slide (photo des étoiles en pose longue) : en quoi le mouvement des étoiles renseigne sur le caractère non-galiléen du référentiel terrestre ?

Réponse : ce n'est pas une manifestation directe mais ça permet d'illustrer le mouvement de rotation de la Terre.

Question : principe de relativité galiléenne ?

Réponse : je ne suis pas sûre.

Correction : Les lois de la physique prennent la même forme dans tous les référentiels galiléens. Il faut avoir bien conscience que c'est un problème qui se mord la queue.

Question : Parlons du principe d'inertie. Est-il toujours vrai ?

Réponse : Il est vrai dans les référentiels galiléens, c'est ce qui définit un référentiel galiléen.

Question : Du coup comment puis-je contrôler le caractère non-galiléen d'un référentiel ?

Réponse : Il faudrait tester tous les termes qu'on a vus dans les accélérations d'entraînement et de Coriolis.

Question : Tu as parlé d'échelles spatiales et temporelles, à quoi on compare les échelles du problème pour décider de prendre en compte ou non le caractère non-galiléen du référentiel ?

Réponse : Par exemple pour un pendule on compare sa période d'oscillation à celle de rotation de la Terre.

Question : Et spatialement ?

Réponse : La longueur de son mouvement au mouvement du référentiel.

Question : Quel phénomène météorologique utilise-t-on souvent pour illustrer le caractère non-galiléen du référentiel terrestre ?

Réponse : Les cyclones qui tournent en sens opposé dans les deux hémisphères.

Question : Que peux-tu dire sur la notion de point coïncident ?

Réponse : Je ne suis plus sûre.

Question : D'où vient la formule $(dA/dt)/R = (dA/dt)/R' + \Omega \text{ vectoriel } A$?

Réponse : Il faut le montrer avec les vecteurs unitaires.

Question : Justement, quand les élèves arrivent en première année, comment est-ce qu'on peut leur faire comprendre la notion de dérivation vectorielle, sachant qu'ils ne connaissent que la dérivation scalaire ? Par rapport à la définition habituelle avec le taux de variation ? Tu peux m'expliquer géométriquement la dérivée du vecteur e_r ?

Réponse : Je l'aurais traité en mécanique du point : on décompose un vecteur unitaire.

Correction : Je voulais un schéma avec deux vecteurs à deux instants successifs et un petit vecteur différence.

Question : Est-ce que $d\Omega/dt$ est nul dans le cas du référentiel terrestre ? (non) Pourquoi n'est-il pas nul, c'est dû à quoi physiquement ?

Réponse : ça dépend du mouvement des astres à proximité de la Terre.

Correction : L'axe de rotation de la Terre bouge, comme dans le gyroscope : il y a un couple qui cause une précession. La Terre ralentit à cause des effets de marées qui dissipent de la puissance dans les milieux mous.

Question : Dans la manip du gyroscope ?

Réponse : Il y a un mouvement supplémentaire.

Question : Est-ce que les journées durent 24h depuis des milliards d'années ?

Réponse : Il y a des effets de marées avec la Lune.

Question : Passons à la partie sur les forces d'inertie. Tu dis que ce ne sont pas réellement des forces. Comment peux-tu l'expliquer à un étudiant ? Qu'est-ce qui les caractérise ?

Réponse : Ce sont des forces qui dépendent du référentiel.

Correction : Oui, ce qui n'arrive jamais pour les autres forces. Deuxio, ne sont pas des interactions. Enfin, elles ne s'annulent pas asymptotiquement.

Question : Tu as beaucoup parlé des deux premières lois de Newton. Que dit la 3è ?

Réponse : C'est la loi des actions réciproques.

Question : Est-ce qu'elle s'applique aux forces d'inertie ? Sous-entendu : est-ce que les forces d'inertie constituent une interaction ?

Réponse : Non.

Question : À quoi sert le référentiel géocentrique ? L'étude du pendule, tu l'as faite dans quel référentiel ?

Réponse : Le référentiel terrestre.

Question : Tu as dit que le caractère galiléen augmentait entre différents référentiels que tu as présentés. Pourrais-tu le quantifier ?

Réponse : Les forces d'inertie deviennent de plus en plus négligeables.

Question : Comment on calcule le champ de gravitation au point M sur Terre ? Cette formule est vraie quand on fait une hypothèse sur la forme de la Terre. Est-ce que g est modifié du fait que la Terre ne soit pas sphérique ?

Réponse : Si mais c'est négligeable.

Correction : J'attendais le théorème de Gauss. Ça marche pour une distribution sphérique mais pas pour une distribution elliptique. L'astuce est de supposer que l'écart à la sphéricité est faible, et de comparer la différence de rayon entre le pôle et l'équateur et de voir la différence de g que cela donne (g varie aussi du fait qu'on se balade sur une ellipsoïde et non sur une sphère). L'effet est presque du même ordre de grandeur que celui de la force d'inertie d'entraînement.

Q : La période du pendule va dépendre de la vitesse de rotation de la Terre ; ça ne dépend que de ça ?

R : Non il va aussi y avoir le sinus de la latitude. Il est nul à l'équateur.

On a la formule $T = T_0 / \sin(\phi)$ avec ϕ la latitude, et T_0 environ 24h.

Q : Dans d'autres référentiels que le réf terrestre, as-tu des exemples de manifestations du caractère non-galiléen ?

R : Il y a des effets de marées.

Q : Quelles conséquences, par exemple sur la Lune ?

R : Elle nous présente toujours la même face.

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

De mon point de vue, peut-être que faire un point de théorie au début n'était pas mal, mais là c'était trop long ; c'était une leçon de cinématique. Les 20 premières minutes sont des maths, et on commence vraiment à discuter des référentiels non galiléens et des applications vers 25 min. C'était un peu en-dehors des clous. C'est dommage : il y a beaucoup à raconter en-dehors des maths. À 25 minutes, on commence sur un truc hyper classique et attendu (le poids, Coriolis). Vous avez internet depuis 3 ans à l'agreg, il faut vraiment que ça serve à quelque chose. Essayez de présenter des phénomènes qui existent : le pendule de Foucault c'est bien mais il y en a 1 sur Terre ; essayez de parler de phénomènes naturels comme les marées (même si c'est très casse-gueule), ou des cyclones, de la dérive des icebergs... Ou aussi des applications concrètes de la force centrifuge. Il faut donner des ordres de grandeur.

Aussi, quand le jury te dit qu'il faut conclure, tu n'as que 15 secondes, il ne fallait pas commencer une vidéo. Il faudrait arriver à mieux anticiper le manque de temps, c'est dommage de faire sauter l'expérience. Gardez bien un œil sur le chronomètre pour éviter ce genre de choses.

Je ne mettrais pas cette leçon en CPGE car elle serait trop limitée.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Sans être absolument hors-sujets, les prérequis/rappels de cinématique et dynamique en RNG doivent être maintenus au minimum. Soit ne pas en faire du tout, soit 10 min grand max.

Il faut consacrer du temps à des applications, soit très classiques, soit plus originales. Penser à utiliser à fond la ressource internet : illustrations, vidéos, ...

Donner dès que possible des ordres de grandeurs, des applications numériques, ...

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Rien n'est indispensable. Sans vouloir donner un catalogue, quelques idées :

- pendule de Foucault
- déviation vers l'Est
- marées : théorie statique, dynamique
- rotation synchrone de la Lune, de Pluton/Charon, résonances des lunes de Jupiter, ...
- dérive des icebergs dans l'océan
- équilibre géostrophique dans l'atmosphère
- dynamique des cyclones (comparer au mythe des tourbillons dans les éviers)
- limite de Roche, conséquences
- érosion au fond des rivières (loi de Baer)
- galaxies spirales

Il faut faire des choix et ne pas donner l'impression de faire un catalogue, bien sûr. Dans la mesure du possible, ne pas se cantonner au référentiel terrestre.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

- cuve remplie d'eau en rotation
- effet de Coriolis sur l'oscillation d'un pendule simple

Bibliographie conseillée :

- pour les notions de base, les livres de cours de prépa et autres
- pour les applications, fouiller les BUP, les livres d'applications de physique (Portelli, ...)