

**Titre :** LP1 Gravitation

**Présentée par :** Timothé Poulain

**Rapport écrit par :**

**Correcteur :** Laurent Le Guillou

**Date :** 15/04/2020

### Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Physique tout-en-un PCSI	Salamito et al.	Dunod	2016
Physique tout-en-un PCSI	Sanz et al.	Dunod	2003

### Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : théorèmes généraux de mécanique classique du point ; accélération d'entraînement ; électrostatique

Introduction

Historique + énoncés des lois de Kepler

I. Interaction gravitationnelle

1) Force gravitationnelle et énergie potentielle

Expression de la force  $\rightarrow$  force conservative, centrale et newtonienne

Expression de l'énergie potentielle de gravitation

Valeur de la constante gravitationnelle

2) Champ gravitationnel et analogie électrostatique

Expression force de Coulomb

Mettre en avant les similitudes ; insister sur les limites de l'analogie

Expression du champ gravitationnel et théorème de Gauss

Pour un astre à symétrie sphérique, le champ créé est identique à celui créé par une masse ponctuelle

3) Relation au champ de pesanteur terrestre

Manip' : mesure du champ de pesanteur avec un pendule

II. Mouvement dans un champ gravitationnel

Hypothèses : Référentiel héliocentrique galiléen + Soleil immobile

1) conséquence du caractère central de la force

TMC  $\rightarrow$  Mouvement plan

Retrouver la loi des aires

2) Conséquence du caractère conservatif de la force

TEC  $\rightarrow$  conservation de l'énergie mécanique

Equation du mouvement

Potentiel effectif  $\rightarrow$  discuter les différentes trajectoires possibles en fonction de la valeur de l'énergie mécanique du système

3) Trajectoires circulaires

Retrouver la 3<sup>e</sup> loi de Kepler

Conclusion

Les planètes ne sont pas ponctuelles  $\rightarrow$  effets inertiels (marée, rotation de la Terre..)

### Questions posées par l'enseignant

**Q1 : Pourquoi peut-on considérer une planète sphérique comme un point matériel ?**

Symétrie sphérique de la distribution de masse => symétrie sphérique du champ gravitationnel (principe de Curie)  
Puis on utilise le théorème de Gauss.

**Q2 : Si la densité varie (uniquement en fonction du rayon), c'est la même chose ?**

Oui, théorème de Gauss

**Q3 : A l'intérieur d'une sphère creuse, c'est quoi le champ gravitationnel ?**

Aucun (encore le théorème de Gauss)

**Q4 : Indiquer en poussant l'analogie électrostatique, c'est quoi l'équivalent de Maxwell-Gauss ?**

Equation de Poisson  $\text{div}(\mathbf{G}) = -4\pi G \rho$

**Q5 : Et Maxwell-Faraday ?**

$\text{rot}(\mathbf{G})$  est nul, pas d'équivalent gravitationnel au champ B

**Q6 : Div(G) forcément négative. En EM, une charge accélérée rayonne et dissipe ainsi de l'énergie. C'est quoi l'analogue gravitationnel ?**

Onde gravitationnelle en relativité générale (mais pas analogie exacte, puisque non newtonien)

**Q7 : Vous avez défini le poids dans la leçon. En pratique, il y a une différence entre poids à l'équateur et au pôle, pourquoi ?**

Accélération centrifuge (inférieure au 1%)

**Q8 : Expérience du pendule : qu'est-ce qui se passe quand les angles ne sont plus petits ?**

Développement limite à l'ordre 3 en  $\theta$  => relation de Bordas, terme en  $\theta^2$

**Q9 : Comment démontrer que les trajectoires keplériennes sont elliptiques ?**

Exprimer  $r$  en fonction de  $\theta$  pour obtenir une équation de conique. Si  $e=0$ , circulaire,  $0 < e < 1$  ellipse,  $e=1$  parabole,  $e > 1$ , hyperbole

**Q10 : Limitations de la gravitation newtonienne dans le système solaire ?**

Avance du périhélie de Mercure.

**Q11 : Différences conceptuelles entre RG et Newton ?**

Découplage entre espace et temps chez Newton, espace euclidien. En RG, variété d'espace-temps pouvant pseudo-riemannienne, pouvant être courbe. La géométrie de l'espace-temps est déterminée par la distribution en matière de l'univers. L'équivalence en masse grave et masse inertielle est élevée au rang de principe.

**Q12 : Ondes gravitationnelles, c'est quoi ?**

Propagation d'une perturbation de l'espace-temps (perturbation linéaire de la métrique). Observée grâce à des interféromètres Michelson géants (plusieurs km) dont la longueur des bras est modifiée lors du passage des OG.

**Q13 : Comment on mesure G ?**

On utilise la troisième loi de Kepler et, connaissant la distance, la masse et la période, on obtient G.

**Q14 : En fait, on mesure plutôt le produit masse Soleil x G. Comment mesurer G (sur Terre) ?**

Pendule de torsion de Cavendish. Des petites masses sont attirées par des grosses masses, induisant un couple de torsion.

**Q15 : Quelle est la limitation de cette expérience ?**

G très faible (compare à toutes les autres forces: pour les systèmes astro, les masses sont très grandes, mais pas pour Cavendish)

**Q16 : Vitesse de libération d'un astre, c'est quoi ?**

Vitesse d'un mobile pour s'extraire du champ de pesanteur d'un corps massif. Utiliser la conservation de l'énergie: quand  $E_m = E_p + E_c = 0$ , on est sur la trajectoire limite entre trajectoire liée et état de diffusion.

**Q17 : Ordre de grandeur de cette vitesse sur Terre ?**

Environ 40000 km/h, ou 11km/s

**Q18 : Ordre de grandeur des masses solaires et terrestres ?**

Sol =  $10^{30}$  kg ; Terre =  $10^{24}$  kg

#### Commentaires donnés par l'enseignant

- Manque peut-être une présentation du plan en intro (et indiquer le niveau, ici CPGE)
- Bonne intro historique (Kepler, Newton, etc).
- Analogie électrostatique bien aussi, ordres de grandeurs utiles
- Première partie sur Kepler peut-être un peu long (mais en l'absence de tableau, difficile à dire)
- Puits de potentiel et conservation de l'énergie très bien
- Dans une des diapositives, rajouter la valeur du rapport correspondant à la troisième loi de Kepler, pour chaque planète
- Peut-être dire un mot ou deux des théories de gravitation au-delà de Newton.
- Applications de la mesure de g (par exemple pour mesurer les inhomogénéités sous-terraines), cf gravimétrie (en ouverture)
- Remarque sur la différence entre Newton et Einstein : pas d'action à distance chez Einstein (les perturbations dans l'espace-temps se propagent à la vitesse de la lumière)

**Partie réservée au correcteur**

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

Leçon bien construite, le plan est très bien. Les principales notions ont été abordées et bien traitées.

Mes remarques détaillées ont été résumées ci-avant (section « Commentaires de l'enseignant »).

Les circonstances (confinement, leçon en vidéo, pas de tableau) n'ont évidemment pas permis de faire la leçon dans les meilleures conditions, mais Timothé s'en est bien sorti à l'aide de transparents (Powerpoint) et de feuilles déjà rédigées présentées devant la caméra.

### **Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates**

(Cf. commentaires dans « Commentaires de l'enseignant » plus haut)

Pour une leçon sur la gravitation donnée dans le cadre du concours « docteurs », le jury s'attendra peut-être à ce que le candidat évoque en fin de leçon la physique au-delà de la mécanique classique newtonienne, en évoquant, même brièvement, la Relativité Générale, ses concepts et les différences fondamentales avec la théorie de Newton.

### **Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)**

Timothé a proposé de réaliser l'expérience du pendule simple pour mesurer la période et en déduire l'accélération de pesanteur  $g$ . On peut aussi effectuer une expérience classique de chute des corps pour différentes hauteurs de départ (expériences de Galilée et similaires, avec deux fourches optiques montées sur une potence verticale (équipée d'une règle) et reliées à un dispositif de chronométrage) ; une expérience de chute des corps dans le vide (pour montrer que tous les corps tombent de la même manière) nécessiterait sans doute une cloche à vide un peu trop grande pour être praticable. De même, l'expérience de Cavendish pour mesurer  $G$  est assez délicate et sans doute un peu risquée dans le cadre d'une leçon d'agrégation...

### **Bibliographie conseillée**

José-Philippe PÉREZ, « Mécanique, Fondements et applications », Dunod (2014) : en particulier les chapitres « 6. Gravitation, Propriétés du champ de gravitation » et « 7. Référentiels non galiléens, Dynamique terrestre ».