
AUTOUR DE LA NOTION DE MASSE

Le candidat est invité à se référer régulièrement à la « Partie C. Annexes » de l'énoncé. Celle-ci regroupe des données utiles à la résolution de certaines questions.

Les différentes parties du sujet sont indépendantes.

Partie A. Existe-t-il plusieurs masses pour un même corps ?

I Principe d'équivalence faible

I.1 Influence de la masse inertielle

Document 1 – La masse inertielle

La masse dite inertielle d'un corps, notée m_i est la mesure de sa « résistance » à toute variation de son mouvement. Elle apparaît dans le principe fondamental de la dynamique, sous la forme :

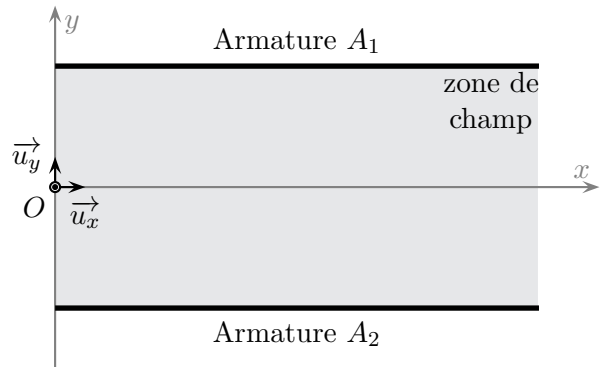
$$\Sigma \vec{F} = m_i \times \vec{a} \quad (1)$$

où $\Sigma \vec{F}$ représente la somme des forces extérieures appliquées au corps et \vec{a} son accélération dans un référentiel supposé galiléen.

Q-1. Énoncer le principe d'inertie.

Q-2. Décrire une expérience simple qui illustre le principe d'inertie.

Pour illustrer l'effet de l'inertie d'un corps sur la variation de son mouvement, on considère la situation suivante dans laquelle nous allons comparer les forces nécessaires pour modifier le mouvement d'un électron de masse m_e et d'un proton de masse m_p . Des électrons de vitesse initiale $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_x$, avec $v_0 = 1,5 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$, pénètrent en un point O dans une zone de l'espace située entre les deux armatures planes et horizontales d'un condensateur. Il règne dans cette zone un champ électrique uniforme \vec{E} de valeur $E = 6,0 \text{ kV.m}^{-1}$. On introduit le repère d'étude direct $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$.



On souhaite que les électrons soient déviés vers le bas.

On suppose que l'intensité du champ de pesanteur local est $g_0 = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$.

Q-3. Montrer que l'effet du poids de l'électron est négligeable devant l'effet de la force électrostatique à laquelle il est soumis.

Q-4. Donner l'expression vectorielle de l'accélération de l'électron en fonction des données du problème. Calculer la valeur de l'accélération de l'électron.

Q-5. Quelle est l'armature chargée positivement ? Justifier. On notera Q sa charge.

Q-6. Établir les équations horaires $(x(t), y(t), z(t))$ du mouvement de l'électron dans le condensateur.

Q-7. En utilisant le principe d'inertie, interpréter pourquoi la vitesse de l'électron selon l'axe (Ox) est constante.

Q-8. Montrer que la trajectoire de l'électron est parabolique.

Q-9. Reproduire sur votre copie, sans souci d'échelle, le schéma du condensateur accompagné des grandeurs suivantes : les charges des armatures A_1 et A_2 , le vecteur vitesse \vec{v}_0 de l'électron, le champ \vec{E} , la force électrostatique \vec{F} , la trajectoire d'un électron entre les deux armatures.

On souhaite maintenant étudier le mouvement d'un proton dans ce condensateur. Le proton pénètre dans la zone de champ électrique au point O précédemment défini dans les mêmes conditions que l'électron.

Q-10. Quelle(s) précaution(s) faut-il prendre pour que le proton ait exactement la même trajectoire que celle de l'électron étudiée précédemment ? Calculer la valeur de la grandeur qui doit alors être modifiée.

On suppose que l'on est en mesure d'introduire un second proton au point J , de coordonnées initiales $(x_J; 0; 0)$ avec $x_J > 0$ et on le lâche sans vitesse initiale au moment où on introduit le premier proton en O à la vitesse initiale \vec{v}_0 . On négligera l'interaction entre ces deux protons vis-à-vis de l'interaction de chacun des protons avec le champ électrique.

Q-11. Le second proton atteindra-t-il l'armature inférieure avant, après ou en même temps que le proton introduit en O ? Justifier.

I.2 Influence de la masse gravitationnelle

Document 2 – La masse gravitationnelle

La masse gravitationnelle, notée m_g , est la grandeur physique intervenant dans la loi de l'attraction gravitationnelle :

$$\vec{F}_g = m_g \times \vec{\mathcal{G}} \quad (2)$$

où $\vec{\mathcal{G}}$ est le champ gravitationnel dans lequel est placé le corps.

Q-12. Quel physicien a découvert la loi de l'attraction gravitationnelle ?

Q-13. Pourquoi dit-on de cette loi qu'elle est universelle ?

Q-14. Comment se compare-t-elle aux autres interactions fondamentales ? Dans quelles situations est-elle prédominante ?

Q-15. Donner l'expression puis calculer la valeur de l'intensité du champ gravitationnel à la surface de la Terre. Même question à la surface de la Lune.

I.3 Universalité de la chute libre

L'universalité de la chute libre, c'est le fait que deux corps lâchés au même endroit et soumis uniquement à l'influence du champ gravitationnel suivent exactement la même trajectoire, même s'ils ont des compositions différentes.

Document 3 – Principe d'équivalence faible

A priori, il n'y a aucune raison pour que les deux masses, masse inertielle et gravitationnelle, soient égales, mais les expériences les plus précises réalisées jusqu'à présent n'ont pas pu révéler une différence entre ces deux masses. C'est pourquoi, on considère par principe, que $m_i = m_g$. C'est une des formulations du principe d'équivalence faible.

Q-16. Montrer que le principe d'équivalence faible conduit à l'universalité de la chute libre.

Document 4 – Galilée et l'expérience de la chute libre du haut de la Tour de Pise

"Aristote déclare qu'un boulet de fer de 100 livres est déjà descendu d'une hauteur de 100 coudées quand un boulet de 1 livre a parcouru seulement une coudée. J'affirme que les deux boulets arrivent ensemble. Si vous faites l'expérience, vous verrez que l'écart est de deux largeurs de doigts seulement. Vous ne trouverez pas avec ces deux doigts les 99 coudées d'écart prévues par Aristote. Des expériences répétées montrent qu'un boulet de 100 livres met 5 secondes pour descendre de 100 coudées. "

Galilée est un des premiers physiciens ayant étudié le mouvement de la chute des corps. On rapporte dans le document 4 ses propos concernant une expérience de chute libre depuis le haut de la Tour de Pise.

Une coudée correspond à 57 cm et une livre à 339,542 g. On prendra $\rho_{fer} = 7,87.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ pour la masse volumique du fer. On rappelle que le volume d'une sphère est relié au rayon R de celle-ci par la relation : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$

Q-17. Calculer les masses (en kg) des boulets de fer évoqués dans le document 4.

Q-18. Calculer le rayon de chaque boulet de fer.

Q-19. Établir l'équation horaire du mouvement de la chute libre des boulets de fer. On se placera dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, auquel on adjoindra un repère d'espace (O, \vec{u}_z) vertical orienté vers le bas. L'origine coïncide avec la position initiale du corps considéré dont on suppose la vitesse initiale nulle.

Q-20. Sur un axe gradué, avec l'échelle 1 cm pour 5 m, placer et numéroter les positions successives du boulet tous les $\tau = 0,5 \text{ s}$.

Q-21. Calculer Δt , la durée de la chute du haut des 100 coudées. Les mesures annoncées par Galilée sont-elles en accord avec les résultats obtenus ? Proposez une explication à l'écart constaté.

Dans sa chute réelle, un boulet est soumis, outre à son poids, à :

- ★ une force de frottement fluide, traduisant la « résistance de l'air », de norme $f = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho_{air} C v^2$ où C est la constante de pénétration du boulet dans l'air et v sa vitesse,
- ★ la poussée d'Archimède, notée $\vec{\Pi}$, égale à l'opposé du poids d'un volume d'air équivalent au volume du boulet.

La figure 1 représente différentes simulations associées à la chute de chacun des types de boulets, respectivement de masse 100 livres et 1 livre.

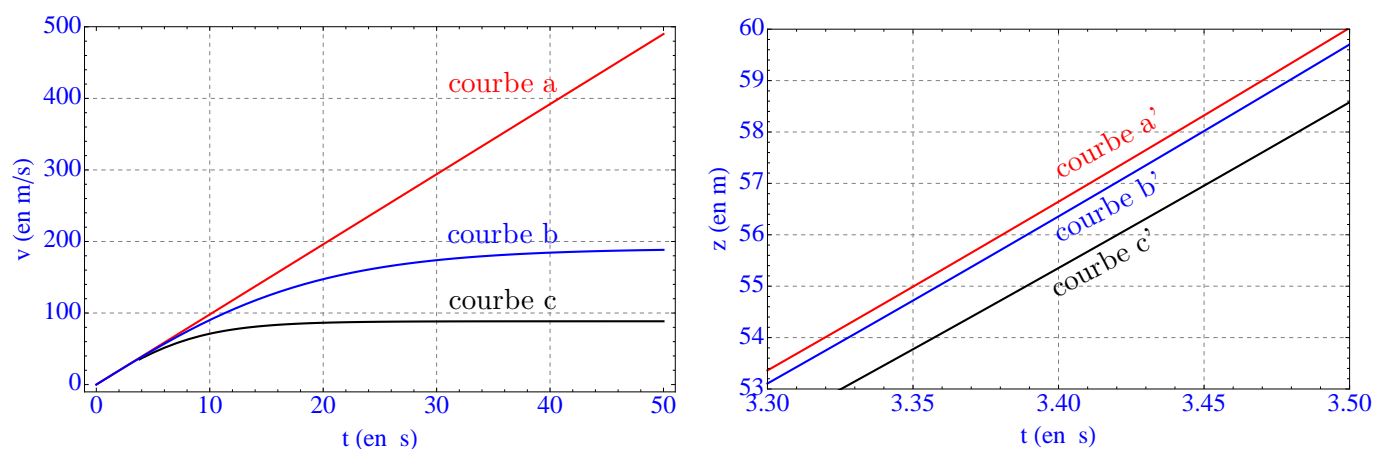


FIGURE 1 – Simulations de la chute des boulets.

Q-22. Sans souci d'échelle, représenter les forces qui s'exercent sur le boulet lors de sa chute dans l'air.

Q-23. Montrer que la poussée d'Archimède est négligeable devant les autres.

Q-24. Montrer qualitativement qu'il est possible que le boulet atteigne un mouvement rectiligne uniforme.

Q-25. En appliquant le principe fondamental de la dynamique, trouver l'expression de la vitesse, notée v_{lim} , pour laquelle le boulet atteint un mouvement rectiligne uniforme. Calculer v_{lim} . On prendra $C = 0,44$.

Q-26. Attribuer alors chaque courbe a, b et c de la simulation numérique au cas qui lui convient. Justifier les choix effectués.

Q-27. Les résultats de la simulation numérique sont-ils en accord avec les mesures annoncées par Galilée ?

Q-28. Pour montrer que la chute des corps est indépendante de la masse de l'objet, que vaut-il mieux choisir comme objets : des objets de même composition mais de rayons différents, ou bien des objets de différentes compositions mais de même taille ?

Comme les objets tombaient trop rapidement pour permettre des mesures directes, Galilée eut l'idée brillante de « diluer la gravité » en faisant rouler des boules sur un plan légèrement incliné. Ses études lui ont permis de conclure que la distance totale augmente comme le carré du temps écoulé.

Q-29. Expliquer ce que signifie « diluer la gravité ».

En 1971, l'expérience de la chute des corps fut refaite sur la Lune par l'astronaute David Scott, qui lâcha un marteau et une plume au même instant ; des millions de téléspectateurs furent ainsi témoins que les deux objets arrivaient en même temps au sol.

II Principe d'équivalence fort

II.1 Gravitation artificielle

La notion de poids est une notion relative comme en témoigne le document 5. Nous allons dans cette partie reformuler le principe d'équivalence pour rendre compte de cette propriété.

Document 5 – Notion de poids apparent

"Si l'on ressent le poids, c'est parce que nous subissons du sol une force de réaction opposée à la pesanteur. Que le sol se dérobe sous nos pieds et c'est la chute : plus de sensation de poids. On est alors en impesanteur. [...] Supposons ainsi que l'on tombe dans un puits vidé de son air. Durant cette chute libre, votre mouvement est uniformément accéléré. Lâchons un objet : il flotte devant vous comme s'il n'avait pas de poids. [...] Dans un avion en vol parabolique, dans un satellite en orbite autour de la Terre, bref dans toutes ces situations où la gravitation est compensée par les forces d'inertie, un corps est en impesanteur."

Dossier Pour la Science, La gravitation, janvier-avril 2003

Une force d'inertie est une force apparente qui agit sur un corps lorsque le mouvement de celui-ci est étudié dans un référentiel accéléré par rapport à un référentiel galiléen.

Le poids apparent d'un corps est l'indication que donnerait un dynamomètre auquel on l'aurait accroché.

Le document 6 énonce le principe d'équivalence fort et fait l'analogie entre une accélération subie par un corps et l'existence d'un champ gravitationnel apparent.

Q-30. L'impesanteur est-elle l'absence de poids ? Justifier.

Q-31. On considère un individu de masse $m = 60$ kg dans une fusée en accélération uniforme par rapport à un référentiel supposé galiléen. Sachant que cet individu pèse 220 N dans la fusée, s'il lâche un marteau dans la cabine d'une hauteur de 1,0 m, quelle sera la durée de la chute ?

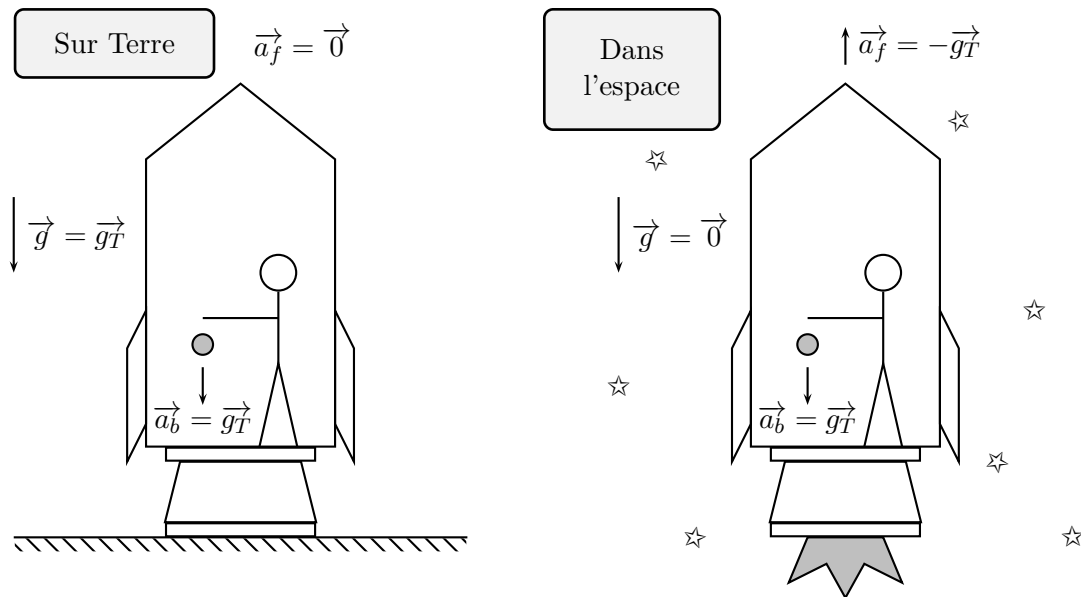
Q-32. Dans certains films de science-fiction, on peut voir des vaisseaux spatiaux en forme de roue dont le mouvement de rotation autour de leur axe induirait une gravité artificielle semblable à celle de la Terre. On considère une roue de 120 m de rayon, dont le centre est en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel supposé galiléen, quelle devrait-être la période de rotation de ce vaisseau pour générer un champ « gravitationnel » artificiel semblable à celui de la Terre ?

Q-33. Préciser le sens du champ « gravitationnel » ainsi créé.

Document 6 – Enoncé du principe d'équivalence fort

Le principe d'équivalence induit que les effets d'un champ gravitationnel sur une expérience de mécanique sont identiques aux effets d'une accélération du référentiel de l'observateur.

On prend ici l'exemple d'un individu lâchant une balle dans une fusée soit au repos sur Terre, soit en accélération uniforme d'intensité égale à l'accélération de la pesanteur. On note \vec{g} le champ gravitationnel extérieur, \vec{g}_T celui de la Terre à sa surface, \vec{a}_b et \vec{a}_f les accélérations respectives de la balle par rapport au référentiel de la fusée et de la fusée par rapport au référentiel terrestre supposé galiléen.



II.2 Déplacement d'un ballon dans une voiture

On considère une voiture initialement au repos. On fixe par l'intermédiaire de deux ficelles, respectivement à son plancher et à son plafond, deux ballons de baudruche remplis respectivement d'hélium (formule brute He) et de dioxyde de carbone (formule brute CO₂) gazeux. La voiture ainsi préparée démarre et conserve une accélération constante pendant un certain temps.

Q-34. Quelle est la ficelle la plus inclinée ? De quel angle s'incline-t-elle ?

Discuter de l'ordre de grandeur de l'accélération nécessaire pour observer un effet significatif.

Cette expérience vous paraît-elle facilement réalisable ?

Pour répondre à cette question, il appartient au candidat de modéliser la situation. Il est notamment attendu de sa part :

- ★ qu'il schématise la situation expérimentale,*
- ★ qu'il introduise les grandeurs physiques pertinentes et qu'il associe à chacune d'entre elles une notation,*
- ★ qu'il précise les lois physiques qu'il est amené à utiliser ainsi que les hypothèses et approximations qu'il est amené à faire,*
- ★ que ses calculs soient menés littéralement mais qu'ils aient pour but final d'obtenir une valeur numérique typique pour des conditions expérimentales réalistes.*

Partie B. Comment mesurer une masse ?

Mesurer avec précision la masse d'un objet est un problème très ancien, notamment parce que la mesure de masse est un rouage essentiel dans le commerce, tant pour évaluer le poids d'une marchandise que pour s'assurer de son échange contre monnaie sonnante et trébuchante¹.

Mesurer une masse, c'est posséder un instrument dont le principe repose sur la comparaison de l'intensité de deux forces dont l'une au moins est le poids associé à l'objet dont on cherche à déterminer la masse. La nature de la seconde force peut varier mais elle doit, dans tous les cas, être parfaitement connue et caractérisée.

Deux cas de figure se présentent :

- ★ soit la seconde force est elle-aussi basée sur la mesure d'un poids pour une masse connue et l'instrument ainsi fabriqué est une balance classique.
- ★ soit la seconde force est de nature différente et le principe de fonctionnement de l'instrument se base la plupart du temps sur la déformation subie par un système soumis à la contrainte extérieure qu'est le poids de l'objet dont on cherche la masse.

Dans le second cas, deux types de mesures sont régulièrement envisagées :

- ★ la première détermine la masse à partir d'un équilibre mécanique statique.
- ★ la seconde consiste à analyser un phénomène périodique et à déterminer la masse d'un objet en déterminant la perturbation qu'entraîne son ajout au système sur les conditions de résonance de celui-ci.

Dans cette partie, nous allons revenir sur ces différentes situations en étudiant quelques dispositifs pratiques.

III Etude d'une balance romaine

III.1 Approche qualitative

Le principe d'une balance est d'établir un équilibre autour d'un axe de rotation fixe par compensation des efforts de deux masses sur la balance. Pour se familiariser avec ce principe, nous allons chercher à décrire quelques situations modèles.

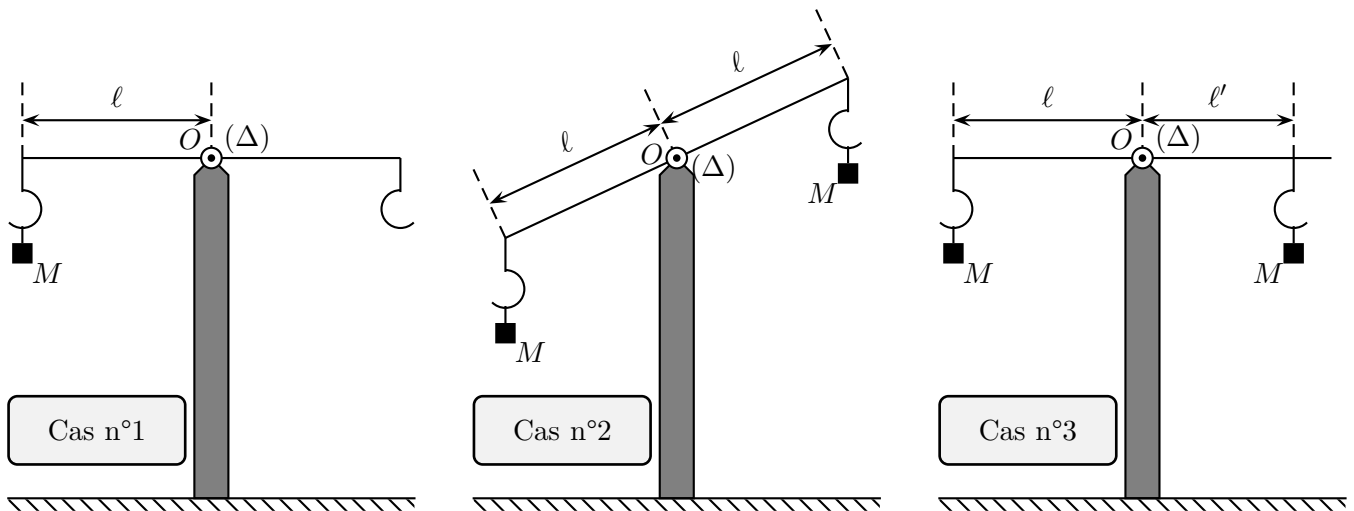


FIGURE 2 – Analyse de l'équilibre mécanique d'une balance à partir de trois conditions initiales différentes.

1. Cette expression signifie d'une part qu'une pièce d'or possédait jadis un tintement particulier et reconnaissable pour l'oreille avertie, et qu'elle pouvait passer sans encombres au test du « trébuchet », c'est-à-dire à la balance d'orfèvre comportant un élément du même nom.

On dispose d'une barre filiforme homogène, parfaitement symétrique, de longueur 2ℓ et pouvant tourner autour d'un axe fixe, noté (Δ) , perpendiculaire à la barre et passant par son centre O . De part et d'autre de O , chaque bras de la balance dispose d'un crochet de pesée dont le point d'attache peut être ajusté tout le long du bras.

On s'intéresse aux trois situations expérimentales qui ont été représentées sur la figure 2.

Cas n°1 : On attache une masse M à l'extrémité gauche de la barre maintenue horizontale, puis on laisse cette dernière évoluer librement en la libérant sans vitesse initiale.

Cas n°2 : On attache une masse M à chaque extrémité de la barre, puis on laisse cette dernière évoluer librement à partir d'une situation non horizontale en la libérant sans vitesse initiale.

Cas n°3 : On attache une masse M à l'extrémité gauche de la barre maintenue horizontale ainsi qu'une seconde masse M en un point situé avant l'extrémité droite de la balance, puis on laisse cette dernière évoluer librement en la libérant sans vitesse initiale.

On se focalise uniquement pour commencer sur l'étude du cas n°1.

Q-35. Décrire l'état final de la balance après son évolution libre.

Q-36. Quel type de mouvement a entraîné la présence de la masse sur le crochet ?

Q-37. Faire l'inventaire des forces extérieures qui s'exercent sur la barre mobile dans le cas n°1.

Q-38. Peut-on déterminer la position finale adoptée par la barre à partir de la seule utilisation de la seconde loi de Newton appliquée à la barre ?

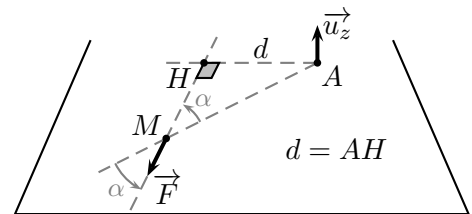
On dispose en mécanique, en plus de la seconde loi de Newton, d'une loi appelée "loi du moment cinétique" qui permet de rendre compte des observations effectuées dans les situations analogues à celles du cas n°1.

Document 7 – Loi du moment cinétique à l'équilibre

On définit, par rapport à un point A de l'espace, le moment $\overrightarrow{\mathcal{M}}_A(\overrightarrow{F})$ d'une force \overrightarrow{F} s'appliquant en un point M comme :

$$\overrightarrow{\mathcal{M}}_A(\overrightarrow{F}) = d \|\overrightarrow{F}\| \overrightarrow{u}_z \quad (3)$$

avec \overrightarrow{u}_z un vecteur unitaire perpendiculaire au plan $(\overrightarrow{AM}, \overrightarrow{F})$ et tel que $(\overrightarrow{AM}, \overrightarrow{F}, \overrightarrow{u}_z)$ forme un trièdre direct, et avec α l'angle entre \overrightarrow{AM} et \overrightarrow{F} . Le terme d est le « bras de levier » de la force \overrightarrow{F} en A . Il correspond à la distance entre le point A et son projeté orthogonal H sur la direction de la force \overrightarrow{F} . On a donc $d = AM \times \sin \alpha$.



Dans sa formulation à l'équilibre, la loi du moment cinétique impose que, dans un référentiel galiléen, la somme vectorielle des moments des forces extérieures, notées \overrightarrow{F}_i , appliquées à un système aux points respectifs M_i , est nulle. Ces moments sont calculés par rapport à un point A , quelconque de l'espace mais fixe dans le référentiel d'étude.

La formalisation mathématique de cette loi à l'équilibre prend la forme suivante :

$$\sum_i \overrightarrow{\mathcal{M}}_A(\overrightarrow{F}_i) = \overrightarrow{0} \quad (4)$$

Q-39. Exprimer le moment en O de chacune des forces extérieures qui s'appliquent à la barre dans le cas n°1 à l'état initial. La somme vectorielle de ces moments est-elle nulle ?

Q-40. Vérifier que chacun de ces moments est nul à l'état d'équilibre final.

On s'intéresse à présent au cas n°2.

Q-41. Quel est l'état mécanique d'équilibre final de la barre dans cette situation ? On justifiera soigneusement sa réponse.

On étudie enfin la situation décrite dans le cas n°3.

Q-42. Quel est l'état d'équilibre final dans le cas n°3 ?

Q-43. Conclure sur le rôle joué par le bras de levier et sur l'intérêt d'appliquer la loi du moment cinétique pour déterminer la position d'équilibre de la barre.

III.2 Description d'une balance romaine

De nombreux modèles de balance ont été conçus depuis plus de cinq millénaires. Nous allons étudier ici le fonctionnement d'une balance romaine, dont un modèle est représenté en photographie sur la figure ci-contre.



Ce type de balance présente la particularité de réaliser l'équilibre grâce à un contre-poids coulissant, appelé « peson », et non grâce aux ajouts successifs de masses marquées sur un plateau de charge, comme dans la plupart des balances traditionnelles.

On présente une modélisation de la plupart des balances romaines sur la figure 3 ci-dessous.

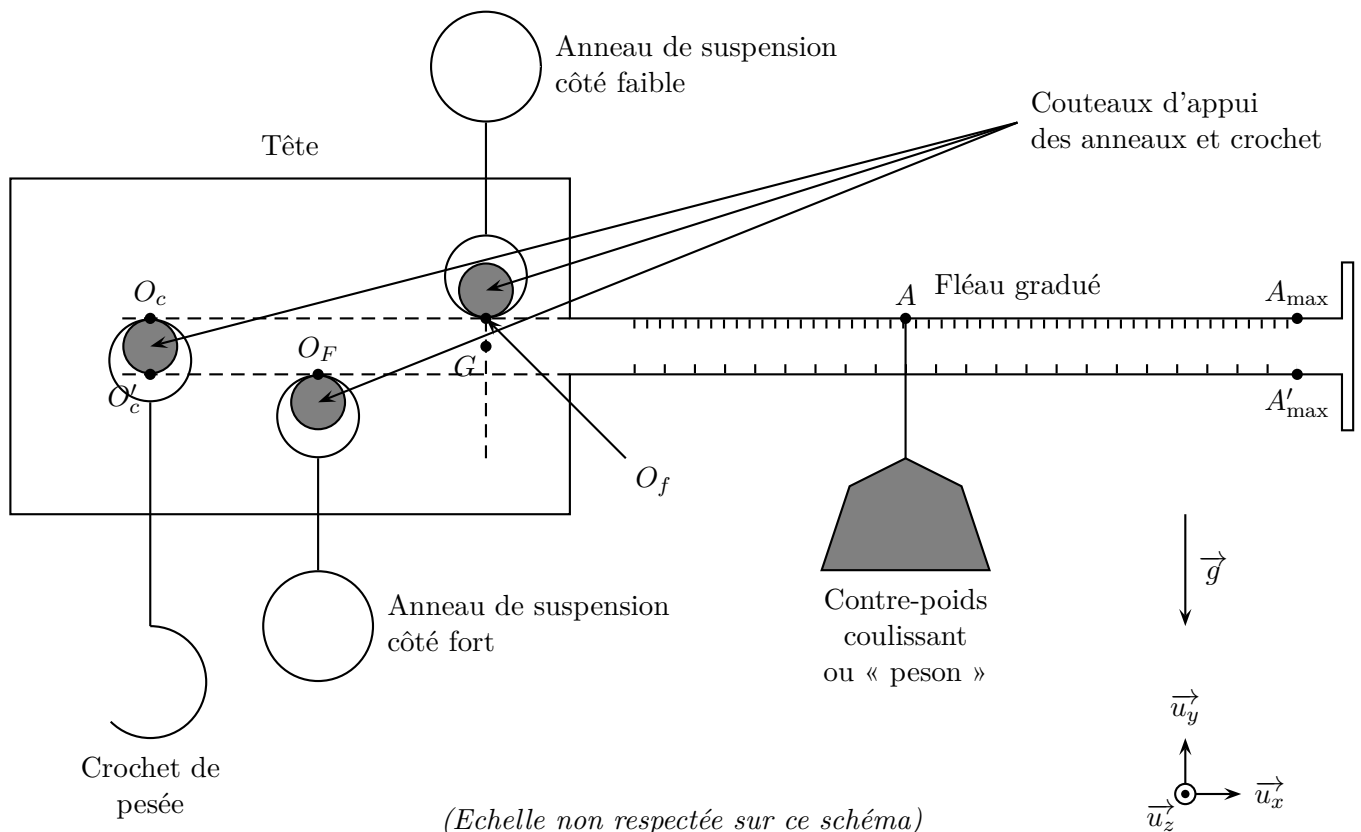


FIGURE 3 – Modélisation et éléments principaux d'une balance romaine

Document 8 – Modélisation d'une balance romaine

Le corps principal de la balance est constitué d'une unique pièce métallique, traditionnellement en fer, dont la forme permet d'identifier deux bras :

- ★ Le « fléau » correspond au bras fin et allongé sur lequel peut coulisser le peson. Ce fléau est gradué sur ces deux tranches pour indiquer, par une simple lecture, la masse qui est à peser.
- ★ La « tête » correspond au bras élargi et plus court de la balance. C'est du côté de la tête que la balance est suspendue grâce à un anneau de suspension et que la masse à peser est accrochée.

Deux anneaux de suspension sont présents sur la plupart des balances romaines et permettent d'effectuer deux types de mesure.

On a indiqué sur la figure 3 quelques points particuliers :

- ★ O_f est le point de contact avec la balance romaine de l'anneau de suspension côté faible.
- ★ O_F est le point de contact avec la balance romaine de l'anneau de suspension côté fort.
- ★ O_c et O'_c sont respectivement les points de contact du crochet à peser avec la balance suivant qu'elle utilise l'anneau de suspension respectivement côté faible ou côté fort.
- ★ A_{\max} et A'_{\max} sont respectivement les positions les plus éloignées de la tête que peut atteindre le peson sur le fléau avec une balance suspendue par l'anneau respectivement côté faible et côté fort.
- ★ G correspond au centre de masse du corps principal de la balance défini comme le point de l'espace où s'applique le poids de la balance, telle qu'elle est ici décrite. On suppose dans la suite que G est situé sur la droite verticale passant par O_f lorsque le corps de la balance est à l'équilibre horizontal.

On note m_b la masse du corps de la balance, m_c la masse du crochet de pesée et m_p la masse du peson. On note en outre $\ell_c = O_f O_c$, $\ell_p = O_f A$, $\ell_M = O_f A_{\max}$ et $L = O_f G$.

Q-44. D'après l'étude menée dans la partie III.1, quel peut être l'intérêt d'utiliser la balance romaine dans l'un ou l'autre des deux sens, c'est-à-dire en la suspendant par l'un ou l'autre des deux anneaux ?

Q-45. Dans quel cas suspendra-t-on la balance par son côté fort ?

Dans la suite du problème, nous nous intéresserons uniquement au cas où la balance est suspendue par l'anneau côté faible et nous considérerons qu'il n'y a pas d'anneau de suspension côté fort. L'ensemble du système pourra être considéré comme plan.

La modélisation de la balance est donc encore simplifiée et on se référera pour la suite de la partie III à la figure 4 correspondant à une balance pouvant pivoter autour de l'axe $(O_f z)$ et dont on repère l'inclinaison par rapport à l'axe horizontal $(O_f x)$ dans une position quelconque grâce à l'angle θ .

Q-46. Montrer que le moment en O_f de la réaction de l'anneau de suspension sur la barre est toujours nul.

Q-47. Reproduire la figure 4 sur votre copie et y représenter les différentes forces qui s'appliquent à la barre dans le cas général.

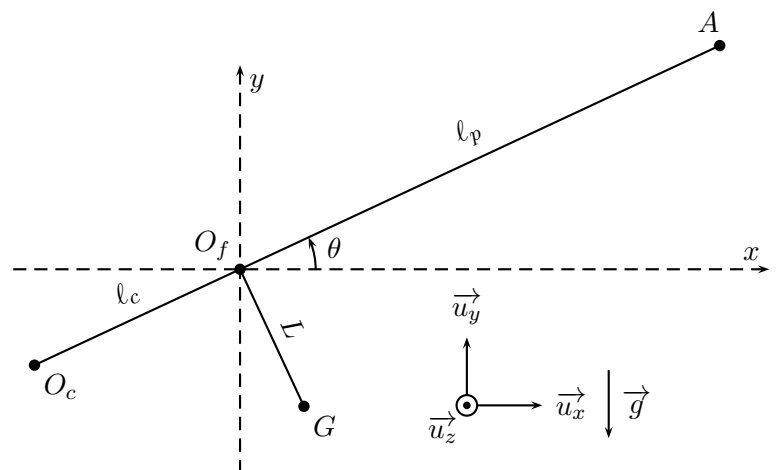


FIGURE 4 – Modélisation simplifiée de la balance romaine.

III.3 Etude de l'équilibre mécanique de la balance pour $m = 0$

Nous allons à présent décrire une séquence de pesée d'un objet de masse m inconnue et fixé sur le crochet de pesée.

Le protocole de mesure de m commence par étudier l'équilibre de la balance « à vide », c'est-à-dire lorsqu'aucune masse n'est fixée sur le crochet de pesée : $m = 0$. On étudie plus particulièrement l'équilibre horizontal de la balance pour lequel l'angle θ de la balance avec l'axe $(O_f x)$ est nul. On note dans ces conditions A_0 la position correspondante du peson sur le fléau.

Q-48. Etablir l'expression de $\ell_0 = \ell_p(m = 0) = O_f A_0$ en fonction de ℓ_c , m_c et m_p .

III.4 Etude de l'équilibre mécanique de la balance pour $m \neq 0$

On poursuit le protocole de mesure en accrochant la masse m inconnue au crochet de pesée.

Q-49. A quel cas de la figure 2 cette situation se rapproche-t-elle le plus ?

Q-50. Dans quel sens doit-on déplacer le peson si l'on souhaite retrouver une situation d'équilibre horizontal de la balance ? On repérera à présent la position du peson grâce à la distance ℓ définie par $\ell_p = \ell_0 + \ell$.

On souhaite retrouver un état d'équilibre de la balance pour un angle θ_{eq} quelconque. L'objectif est de déterminer l'expression de la longueur ℓ en fonction de la masse m .

Q-51. Déterminer l'expression de l'angle θ_{eq} en fonction de m , m_p , m_b , L , ℓ_c et ℓ en appliquant la loi du moment cinétique à l'équilibre.

Q-52. Quelle relation vérifie ℓ , ℓ_c , m_p et m si on ramène θ_{eq} à une valeur nulle ?

Q-53. En déduire le principe de fonctionnement de la balance romaine. On explicitera notamment dans le détail un protocole permettant de graduer le fléau pour réaliser la conversion "longueur - masse".

Q-54. Pendant très longtemps, la balance romaine a été préférée aux balances à plateaux par les maraîchers. Proposer une justification à ce choix.

Q-55. On appelle sensibilité, notée S , la variation de position du peson par unité de masse ajoutée au crochet de pesée. Etablir l'expression de la sensibilité en fonction de ℓ_c et de m_p .

Q-56. Quelle est l'expression de la portée M de la balance, valeur maximale de masse m qui peut être mesurée sur cette balance ? On exprimera le résultat en fonction de m_p , m_c , ℓ_M et ℓ_c .

Q-57. En déduire l'expression de la sensibilité S en fonction de M , m_c et ℓ_M .

On souhaite fabriquer, côté faible, une balance d'une portée de 5,00 kg. On souhaite pour cela utiliser un fléau de longueur $\ell_M = 50,0$ cm, un peson de $m_p = 500$ g et un crochet de masse $m_c = 100$ g.

Q-58. Déterminer les valeurs de ℓ_c et de ℓ_0 correspondant à une telle balance.

Q-59. Déterminer la sensibilité de cette balance. On exprimera le résultat en cm.kg^{-1} .

On suppose à présent que la balance a été conçue de manière à ce que la position ℓ_0 corresponde à un peson en butée contre la tête de la balance. On s'intéresse, pour ces dernières questions, au côté fort de la balance précédente en retournant cette dernière pour la suspendre par le second anneau.

On appelle J le point d'intersection de la droite $(O_f G)$ et du segment $[O_F A'_{\text{max}}]$ et on note dans ce cas $d = O_F J$. On donne $m_b = 250$ g. On souhaite disposer côté fort d'une portée $M' = 20,0$ kg.

Q-60. Faire un schéma de la situation puis déterminer l'expression de d en fonction de ℓ_c , ℓ_M , m_c , m_p , m_b et M' . On supposera qu'il n'y a pas d'anneau de suspension coté faible et on se limitera au cas où l'angle θ de la balance avec l'horizontale est nul.

Calculer la valeur de d .

Q-61. Quelle est la masse minimale que l'on peut mesurer côté fort ?

Q-62. La sensibilité de la balance est-elle meilleure côté fort ou côté faible ?

L'étude des balances romaines menée dans cette partie a montré la nécessité d'avoir recours à des étalons de masse. Nous allons à présent étudier la manière dont est définie l'unité de masse à l'heure actuelle.

IV Prototype international du kilogramme ou P.I.K.

"Qu'il n'y ait plus sur le territoire deux poids et deux mesures"

Il s'agit là d'une des doléances les plus fréquemment rencontrées dans les cahiers de doléances mis à la disposition du peuple par Louis XVI à la fin du XVIII^{ème} siècle. C'est par une loi datant du 1er août 1793, que fut imposée l'uniformité des poids et mesures sur le territoire de la République².

Dans le nouveau système des poids et mesures, on se réfère au mètre pour définir le kilogramme, l'unité de masse. Initialement, on prit l'eau comme référence en définissant le kilogramme comme "le poids du décimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité". Pour des raisons pratiques, on développa en parallèle des étalons en platine car ce métal "est le moins dilatable par la chaleur et le moins condensable par le froid, bref, le moins susceptible de s'altérer d'aucune sorte"³. Après sa présentation le 22 juin 1799, le prototype réalisée par Fortin devint l'étalon de référence de masse et fut consigné aux Archives de France.

A l'heure actuelle, l'unité de masse reste la seule unité du système international à être définie à partir d'un objet matériel que l'on appelle le prototype international du kilogramme (P.I.K.).

Dans le système international d'unités tel qu'il est actuellement défini et structuré, et dont on rappelle les définitions dans le tableau 1 fourni en annexe, le kilogramme occupe une place importante car il contribue à la définition de quatre unités de base sur les sept de ce système. Sa stabilité est donc importante.

Actuellement plusieurs laboratoires dans le monde cherchent à construire une expérience qui pourrait définir le kilogramme à partir de constantes fondamentales de la nature. Dans sa session de 2011, la Conférence générale des poids et mesures convient que le kilogramme devrait être redéfini en fonction de la constante de Planck. C'est le projet de la balance du watt en cours de réalisation.

Document 9 – Prototype international du kilogramme

Le P.I.K. a la forme d'un cylindre de 39,17 mm de hauteur et de diamètre. Il est constitué d'un alliage de 90% en masse de platine et de 10% en masse d'iridium.

Le P.I.K. et ses six copies ont été fabriqués à la fin du XIX^{ème} siècle, ils sont déposés au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, en France. Ils sont protégés chacun par trois cloches de verre scellées dans un coffre-fort spécial à l'environnement contrôlé. Trois clés indépendantes sont nécessaires pour ouvrir ce coffre. Le P.I.K. n'est extrait de son coffre que pour en réaliser des étalonnages tous les 50 ans environ.

En dépit des précautions prises, les physiciens constatent que la masse moyenne de l'ensemble des copies du prototype et du prototype international a vraisemblablement augmenté de plusieurs microgrammes depuis la troisième vérification. Les raisons de cette augmentation observée ne sont, à l'heure actuelle, pas assez bien connues.

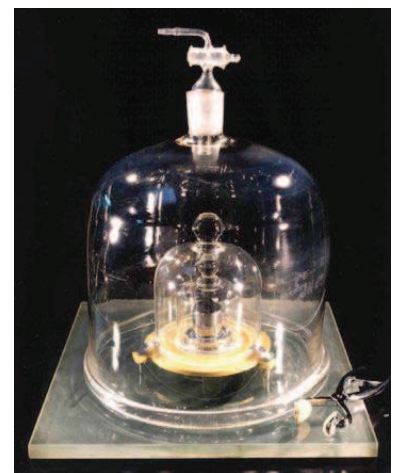


FIGURE 5 – Source BIPM

2. D'après Denis Guedj, *Le mètre du monde*, Le Seuil, 2000.

3. D'après Denis Guedj, *Le mètre du monde*, Le Seuil, 2000.

Q-63. Montrez que la masse intervient dans la définition des unités de base du système international (SI) suivantes : la mole, l'ampère et la candela.

Q-64. Quels inconvénients pratiques présente l'utilisation d'un objet matériel comme étalon de masse ?

Q-65. Quels sont les principaux phénomènes physico-chimiques qui peuvent affecter la stabilité des étalons de masse au cours du temps ?

Q-66. En déduire une série de critères de choix du matériau pour la fabrication d'un étalon de masse.

Le tableau 2, fourni en annexe, répertorie quelques unes des propriétés physiques d'un certain nombre de métaux. Pour chacune des questions qui suivent, on attend des candidats une réponse clairement argumentée.

Q-67. Parmi les éléments métalliques fournis dans le tableau 2, quel aurait été le meilleur candidat pour réaliser un prototype du kilogramme ? Pourquoi cet élément n'a-t-il pas été choisi ?

Q-68. Le fer ou l'argent sont nettement moins coûteux que le platine et plus abondants que celui-ci. Pourquoi n'ont-ils pas été, à leur tour, retenus ?

Q-69. En vous aidant du tableau 2, quels intérêts pourrait-il y avoir à ajouter de l'iridium dans le P.I.K. ?

Q-70. A l'aide du document 9, calculer la masse volumique du P.I.K..

Q-71. Parmi les phénomènes cités à la question **Q-65.**, lesquels seront limités si la masse volumique du P.I.K. est élevée ?

Q-72. Quelle forme devrait adopter le P.I.K. pour réduire encore l'influence de ces phénomènes ? Pourquoi n'a-t-elle finalement pas été adoptée ?

Q-73. Doit-on utiliser à un matériau possédant des conductivités électrique et thermique élevées ou faibles ?

On s'intéresse brièvement aux évolutions possibles de l'étalon de masse de référence.

Q-74. Rappeler l'unité de la constante de Planck dans le système international d'unités.

Q-75. Dans quel domaine de la physique intervient la constante de Planck ? Citer deux relations dans lesquelles intervient h et expliquer leur signification.

Q-76. Quel peut être l'intérêt de se référer à l'avenir à la constante de Planck pour définir le kilogramme ?

V Mesures de masse à différentes échelles

Grâce au P.I.K. et à ses multiples répliques, mesurer une masse avec précision s'avère faisable lorsque celle-ci est de l'ordre du kilogramme. A très petite comme à très grande échelle, il est cependant nécessaire de faire appel à d'autres techniques pour déterminer la masse d'un objet.

Nous allons à présent nous intéresser à la manière dont est notamment déterminée la masse des exoplanètes à l'échelle astronomique et la masse des dépôts de couches minces à l'échelle microscopique.

V.1 Comment déterminer la masse des exoplanètes ?

51 Pegasi est une étoile située à environ 48 années de lumière de la Terre dans la constellation de Pégase. Par bien des aspects, 51 Pegasi est très semblable au Soleil. Les deux étoiles sont toutes les deux des naines jaunes, et leurs masses sont très proches l'une de l'autre.

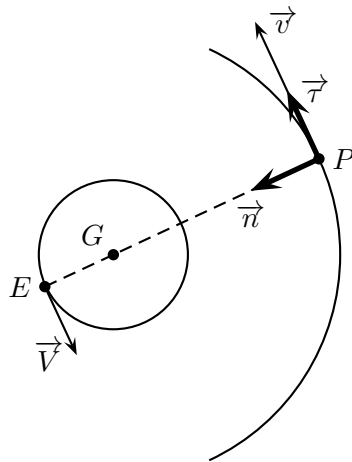
En 1995, c'est autour de cette étoile que la première exoplanète, nommée 51 Pegasi b, fut découverte par les astrophysiciens Michel Mayor et Didier Queloz de l'Observatoire de Genève.

Nous allons étudier ici le principe de la méthode employée qui a non seulement permis de détecter l'existence de centaines d'exoplanètes mais aussi d'en révéler quelques caractéristiques, notamment leur masse.

Une modélisation de la situation physique est décrite dans le document 10 ci-après.

Document 10 – Modélisation du problème, le système {étoile-planète}

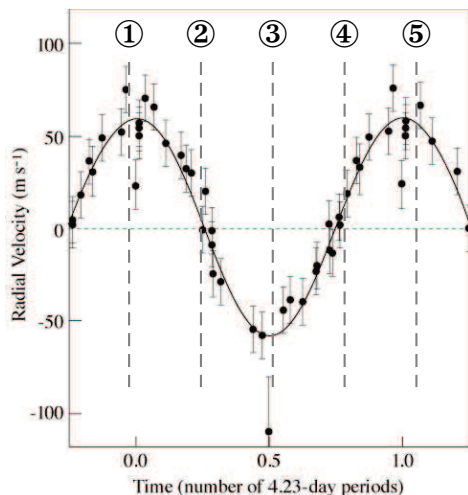
- ★ Les deux objets, planète et étoile, forment un système isolé.
- ★ On note m la masse de la planète et M la masse de l'étoile. On donne $M = 1,06 \times M_S = 2,11 \cdot 10^{30}$ kg.
- ★ La planète (P) et l'étoile (E) orbitent autour du centre de masse, noté G , du système {étoile-planète} qui vérifie la relation : $M\vec{G}\vec{E} + m\vec{G}\vec{P} = \vec{0}$.
- ★ Le référentiel \mathcal{R} lié à G est supposé galiléen.
- ★ La planète a une orbite circulaire de rayon $r = GP$ autour de G .
- ★ L'étoile a une orbite circulaire de rayon $R = GE$ autour de G .
- ★ On note respectivement, dans \mathcal{R} , \vec{v} et \vec{V} les vecteurs-vitesse de la planète et de l'étoile comme indiqué sur la figure ci-dessous. On leur associe les normes respectives v et V .
- ★ La vitesse radiale est la vitesse d'un objet mesurée dans la direction de la ligne de visée d'un observateur fixe depuis son point d'observation. Il s'agit donc de la projection de la vitesse de l'objet sur la ligne de visée orientée dans le sens étoile \rightarrow observateur
- ★ On note v_r la vitesse radiale de la planète et V_r la vitesse radiale de l'étoile.
- ★ Pour simplifier, on suppose que l'observateur est fixe dans \mathcal{R} , et se situe dans le plan de l'orbite à grande distance du système {étoile-planète}.



Accélération de la planète en projection dans le repère $(G, \vec{\tau}, \vec{n})$:

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{\tau} + \frac{v^2}{r} \vec{n}$$

Document 11 – Mesures de V_r de l'étoile 51 Pégasi au cours du temps



La courbe ci-contre présente les mesures expérimentales de la vitesse radiale de l'étoile 51 Pégasi au cours du temps.

Ces résultats peuvent en très bonne approximation être modélisés par une loi sinusoïdale de la forme suivante :

$$V_r = A \times \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (5)$$

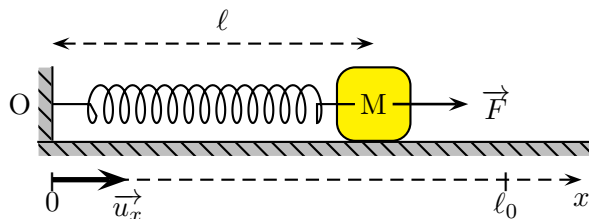
La période T vaut ici $T = 4,23$ jours.

- Q-77.** Etablir la relation entre \vec{v} , \vec{V} , m et M .
- Q-78.** Justifier, à l'aide de schémas, l'égalité des périodes de révolution des deux astres autour de leur centre de masse.
- Q-79.** Rappeler qualitativement le principe de l'effet Doppler.
- Q-80.** Quelle observation sur le spectre de l'étoile permet de détecter la présence d'une planète ?
- Q-81.** Décrire l'évolution du spectre de l'étoile au cours d'une période de révolution autour de G . Dessiner les configurations du système {étoile-observateur} correspondant aux instants ①, ②, ③, ④ et ⑤ de la courbe représentée dans le document 11.
- Q-82.** Quelle est la signification physique des grandeurs A et T dans l'équation (5) du document 11 ?
- Q-83.** Justifier qualitativement que R est négligeable devant r .
- Q-84.** On considère que E est confondu avec G . Exprimer r^3 en fonction de \mathcal{G} , M et T . Calculer r .
- Q-85.** Etablir que $v = \sqrt{\frac{\mathcal{G}M}{r}}$, puis calculer numériquement la vitesse de la planète.
- Q-86.** En déduire la valeur de la masse de la planète.
- Q-87.** Expliquer pourquoi 51 Pegasi b est qualifiée de "Jupiter chaud".
- Q-88.** La méthode de détection d'exoplanètes par l'étude de la vitesse radiale des étoiles permet essentiellement de détecter des planètes de type Jupiter chaud. Pourquoi ne permet-elle pas de détecter des planètes qui ressembleraient davantage à la Terre ?
- Q-89.** En pratique, les observations mentionnées ici sont effectuées depuis la Terre. Quelles corrections doit-on apporter au modèle proposé dans le document 10 pour mieux exploiter les observations et déduire plus fidèlement la masse d'une exoplanète comme 51 Pegasi b ?

V.2 Maîtriser l'épaisseur des dépôts de couches minces

V.2.a Principe général

Pour une mesurer une masse, il n'est pas nécessaire de faire référence à un contre-poids comme dans le cas de la partie III. Il est possible d'utiliser une autre force, comme par exemple la force de rappel élastique d'un ressort de raideur k , de longueur instantanée ℓ et de longueur à vide ℓ_0 : $\vec{F} = -k(\ell - \ell_0)\vec{u}_x$.



On dispose d'un ressort de masse négligeable muni d'un crochet de suspension, d'une règle graduée, d'un jeu de masses marquées et d'un objet de masse inconnue.

- Q-90.** Proposer un protocole expérimental permettant d'avoir accès à la masse inconnue par application de la seconde loi de Newton à l'équilibre. On établira l'expression de cette masse en fonction des paramètres du problème et on discutera les différents types de mesurage à effectuer pour obtenir le résultat.

Cette méthode est très efficace pour des masses courantes mais elle devient impossible à mettre en oeuvre lorsque la masse à mesurer est extrêmement faible. La sensibilité du dispositif ne permet pas le recours à une mesure statique basée sur la détermination d'une position d'équilibre.

On fait alors souvent appel à un phénomène périodique pour en déduire la valeur de la masse inconnue.

On s'intéresse à nouveau au ressort précédent. L'une de ses extrémités est fixe dans le repère d'étude et le ressort peut s'étirer ou se comprimer verticalement le long de l'axe dirigé par la pesanteur noté (Oz) .

On fixe à son autre extrémité un objet de masse m et de centre de masse G . On choisit comme origine le point O correspondant à la position de G au repos et on repère à tout instant la position de l'objet par sa coordonnée $z(t)$ le long de (Oz) . On écarte l'objet de sa position d'équilibre d'une distance z_0 vers le bas puis on le lâche sans vitesse initiale à $t = 0$ s.

Q-91. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par le centre de masse G au cours du temps, lorsque l'objet n'est soumis qu'à son poids et à la force de rappel élastique \vec{F} .

Q-92. Une solution de l'équation différentielle peut se mettre sous la forme :

$$z(t) = Z_m \cos \left(2\pi \frac{t}{T_0} + \varphi \right)$$

avec Z_m l'amplitude du mouvement et φ la phase initiale.

Déterminer l'expression de T_0 en fonction de k et de m , puis calculer les valeurs de Z_m et de φ .

Q-93. A quel type de mouvement correspond ce type de solution ?

On modifie légèrement la masse de l'objet que l'on note à présent $m' = m + \delta m$ de sorte que δm est négligeable devant m .

Q-94. Déterminer la nouvelle expression de T_0 , notée T'_0 , en fonction de T_0 , m et δm . On pourra utiliser l'approximation $(1+x)^\alpha \simeq 1 + \alpha x$ lorsque $x \rightarrow 0$.

En déduire le rapport de fréquence $\frac{\delta f_0}{f_0} = \frac{f_0 - f'_0}{f_0}$, où f_0 et f'_0 sont respectivement les fréquences dites "propres" associées à T_0 et T'_0 .

Q-95. Sachant qu'il est possible de mesurer facilement des fréquences à 1 Hz près, calculer la fréquence f_0 associée à T_0 permettant de mesurer une variation de masse de $1 \mu\text{g}$ pour une masse de l'objet initial $m = 1$ g.

V.2.b Etude d'une microbalance à cristal de quartz

Une microbalance à cristal de quartz (MCQ) fonctionne sur le principe décrit dans la partie précédente. Le quartz, de formule brute SiO_2 , est un matériau dur (7 sur l'échelle de Mohs), fragile et transparent, de masse volumique $\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Le quartz est, en outre, un matériau piézoélectrique. Si on considère un morceau taillé de cristal de quartz et que l'on impose une tension électrique à ses bornes, le matériau réagit en subissant une contrainte mécanique. Inversement, si l'on soumet le quartz à une contrainte mécanique, une tension électrique apparaît entre ses bornes.

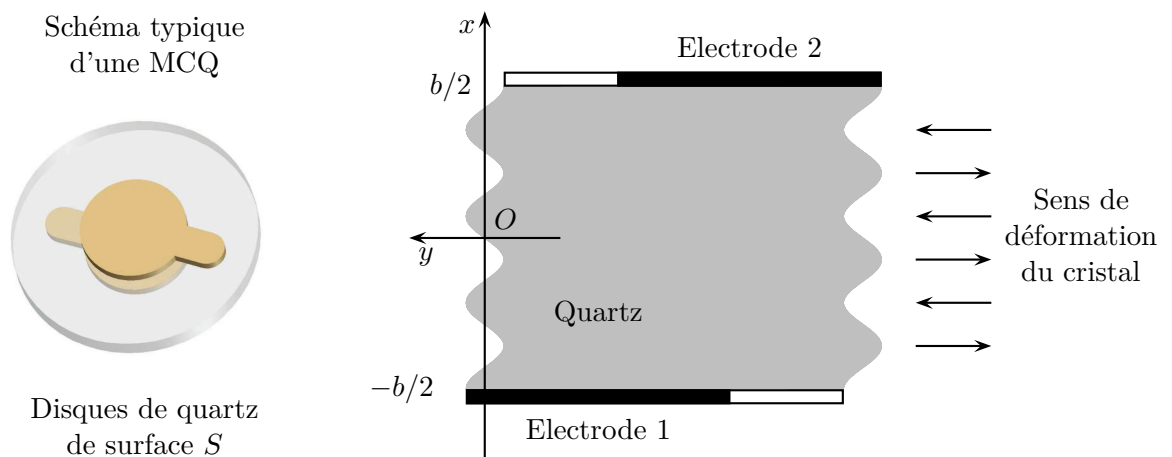


FIGURE 6 – Schéma d'une microbalance à quartz et modélisation des modes de résonance au sein du cristal.

La structure cristalline du quartz lui confère de très bonnes propriétés de résonance. Si l'on applique une tension électrique alternative au quartz à une fréquence proche de sa fréquence propre f_0 , on provoque l'apparition d'ondes progressives de cisaillement dans le cristal, analogues à des ondes sismiques, de célérité $c_q = 3340 \text{ m.s}^{-1}$, dont l'amplitude peut devenir très importante et qui déforment le cristal.

On a représenté sur la figure 6 un exemple de microbalance à cristal de quartz (MCQ) et le type de résonance observée lorsqu'une tension sinusoïdale de la forme $U(t) = U_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$ est appliquée au cristal. Il s'agit du même type d'ondes que celles observées sur une corde vibrante.

On considère une corde tendue horizontalement d'axe (Ox) . Deux ondes transverses s'y propagent en sens inverse l'une de l'autre, les elongations transversales de ces ondes sont modélisées par les équations :

$$y_+(x, t) = Y_m \cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right) \quad \text{et} \quad y_-(x, t) = Y_m \cos\left(2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi\right)$$

Q-96. Quelle relation existe-t-il, pour une onde progressive sinusoïdale entre T , λ et c_q ?

Q-97. Dans quel sens se propage l'onde $y_+(x, t)$?

Q-98. Sachant qu'en tout point de la corde, et à tout instant, les déformations dues aux ondes s'additionnent, on admet que l'onde y_r résultant de la superposition de y_- et y_+ s'écrit :

$$y_r(x, t) = y_-(x, t) + y_+(x, t) = Y_0 \cos\left(2\pi\frac{t}{T} + \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (6)$$

Déterminer l'expression de Y_0 .

Dans le cas du cristal de quartz, d'épaisseur b , on montre que la déformation transverse prend la forme de l'équation (6) et s'écrit :

$$y_r(x, t) = Y_0(x) \cos\left(2\pi\frac{t}{T} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

où $Y_0(x) = Y_0 \cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda} + \frac{\varphi}{2}\right)$ représente l'amplitude de la déformation en un point d'abscisse x .

La symétrie de l'excitation du système impose que la déformation est nulle à tout instant en $x = 0$ et que son amplitude $Y_0(x)$ est maximale en $x = \pm b/2$.

Q-99. Déterminer la valeur de φ .

Q-100. Montrer que les conditions limites en $x = \pm b/2$ imposent une quantification des valeurs de la longueur d'onde donnant lieu à un phénomène de résonance, celles-ci ne pouvant prendre que les valeurs :

$$\lambda_p = \frac{2b}{2p+1} \quad \text{avec} \quad p \in \mathbb{N} \quad (8)$$

Q-101. On note f_q la fréquence de résonance fondamentale correspondant à $p = 0$. Calculer l'épaisseur b du cristal donnant lieu à une fréquence fondamentale de 5,00 MHz.

On considère dans la suite du problème que le cristal de quartz est taillé de manière à posséder une fréquence fondamentale de 5,00 MHz.

On dépose à présent un film homogène de masse M_f de manière uniforme à la surface S du résonateur à quartz étudié ci-dessus. Dans le cas où M_f est négligeable devant M_q , la masse du cristal de quartz résonant, Günter Sauerbrey montra en 1959 que la fréquence fondamentale du quartz était déplacée d'une quantité δf_q vérifiant la relation :

$$\frac{\delta f_q}{f_q} = -\frac{M_f}{M_q} \quad (9)$$

On introduit les masses par unité de surface $m_f = \frac{M_f}{S}$ et $m_q = \frac{M_q}{S}$.

Q-102. Exprimer m_q en fonction de ρ_q et b .

Q-103. En déduire que l'équation (9) se met sous la forme :

$$\frac{\delta f_q}{f_q} = -\frac{2m_f f_q}{\rho_q c_q} \quad (10)$$

Q-104. Calculer la valeur de m_f donnant lieu à un décalage en fréquence de 1 Hz. On exprimera le résultat en ng.cm^{-2} .

En considérant que la masse volumique du matériau déposé est d'environ 3.10^3 kg.m^{-3} , estimer l'ordre de grandeur de l'épaisseur du dépôt. Commenter.

Q-105. Outre l'extrême sensibilité de cette méthode à la masse déposée, quels avantages présentent l'utilisation d'une microbalance à quartz ?

Q-106. Quels inconvénients doit-on cependant prendre en compte dans le cadre d'un dépôt multicouches ?

Partie C. Annexes

Électron, proton et gravitation

La masse de l'électron vaut : $m_e = 9,1.10^{-31}$ kg.

La masse du proton vaut : $m_p = 1,6.10^{-27}$ kg.

La charge élémentaire vaut : $e = 1,6.10^{-19}$ C.

La constante universelle de gravitation vaut $\mathcal{G} = 6,674 \times 10^{-11}$ m³.kg⁻¹.s⁻².

Théorème d'Archimède

On rappelle que la poussée d'Archimède subie par un corps plongé dans un fluide est égale à l'opposé du poids d'un volume de ce fluide équivalent au volume du corps immergé dans le fluide.

Quelques données physico-chimiques

On considère que l'air est composé à 80% de molécules de diazote et à 20% de molécules de dioxygène.

Le volume molaire de l'air à 20 °C et à pression atmosphérique est $V_m = 24,055$ L.mol⁻¹.

La constante des gaz parfait est $R = 8,314$ J.K⁻¹.mol⁻¹.

On donne les masses atomiques :

— de l'hélium $M(\text{He}) = 4,0$ g.mol⁻¹

— du carbone $M(\text{C}) = 12,0$ g.mol⁻¹

— de l'azote $M(\text{N}) = 14,0$ g.mol⁻¹

— de l'oxygène $M(\text{O}) = 16,0$ g.mol⁻¹

La Terre

On suppose que la Terre est un corps à répartition de masse sphérique.

La masse de la Terre vaut : $M_T = 5,9736 \times 10^{24}$ kg.

La distance moyenne Terre - Soleil vaut : $D_{TS} = 1,4960.10^8$ km = 1 UA où UA est l'unité astronomique.

Le rayon de la Terre vaut : $R_T = 6,371.10^6$ m.

On suppose que l'orbite de la Terre autour du Soleil est circulaire.

La Lune

On suppose que la Lune est un corps à répartition de masse sphérique.

La masse de la Lune vaut : $M_L = 7,347.10^{22}$ kg.

Le rayon de la Lune vaut : $R_L = 1,736.10^6$ m.

Jupiter

La masse de Jupiter vaut : $M_J = 1,898.10^{27}$ kg. Le rayon de Jupiter vaut : $R_J = 69,911.10^6$ m.

A propos des unités du système international

Tableau 1 – *Les unités du système international*

Unité (symbole)	Définition
mètre (m)	Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.
kilogramme (kg)	Le kilogramme est la masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence générale des poids et mesures tenue à Paris en 1889 et qui est déposé au Bureau International des Poids et Mesures.
seconde (s)	La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.
ampère (A)	L'ampère est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.
kelvin (K)	Le kelvin est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.
candela (cd)	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.
mole (mol)	La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans $0,012$ kilogramme de carbone 12.

Quelques données sur les métaux

On regroupe ici les évolutions de quelques unes des propriétés physiques de certains métaux :

- ★ On y indique Z , le numéro atomique de l'élément étudié.
- ★ On fournit l'année de découverte de l'élément (Année).
- ★ On donne la masse volumique ρ à 25 °C en kg.m^{-3} .
- ★ On donne aussi la température de fusion T_{fus} en °C.
- ★ On indique par α le coefficient de dilatation des métaux à 300 K en 10^{-6}K^{-1} .
- ★ On fournit la dureté du métal sur l'échelle de Mohs, graduée de 1 pour le talc à 10 pour le diamant.
- ★ On fournit les valeurs des conductivités électrique σ (en $10^6 \Omega^{-1}.\text{cm}^{-1}$) et thermique λ_T (en $\text{W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Tableau 2 – Quelques informations sur les métaux et leurs propriétés.

Elément	Z	Année	ρ	T_{fus}	α	Mohs	σ	λ_T
aluminium	13	1825	2698	660	23	3	0,377	2,37
titane	22	1791	4540	1668	8,6	6	0,023	0,219
fer	26	-2500	7874	1538	11,8	4	0,093	0,802
cuivre	29	-5000	8960	1085	16,5	3	0,596	4,01
zinc	30	-1500	7133	419	30,2	2,5	0,166	1,16
argent	47	-3000	10500	961	18,9	2,5	0,630	4,29
tungstène	74	1783	19300	3422	4,5	7,5	0,189	1,74
osmium	76	1803	22590	3033	5,1	7	0,109	0,876
iridium	77	1803	22560	2446	6,4	6,5	0,197	1,47
platine	78	1700	21450	1768	8,8	3,5	0,096	0,716
or	79	-3000	19320	1064	14,2	2,5	0,452	3,14
mercure	80	-1500	13546	-39	60,4	N.A.*	0,010	0,083
plomb	82	-1000	11350	327	28,9	1,5	0,048	0,353

* Non attribué