

# DS PHYSIQUE 4

EC : Mécanique

Durée : 2h30. Aucun document autorisé. Calculatrice interdite. Encadrer les résultats. Utilisez des expressions littérales, sauf si on vous demande explicitement une valeur numérique.

## EXERCICE 1 – Questions de cours

Définitions :

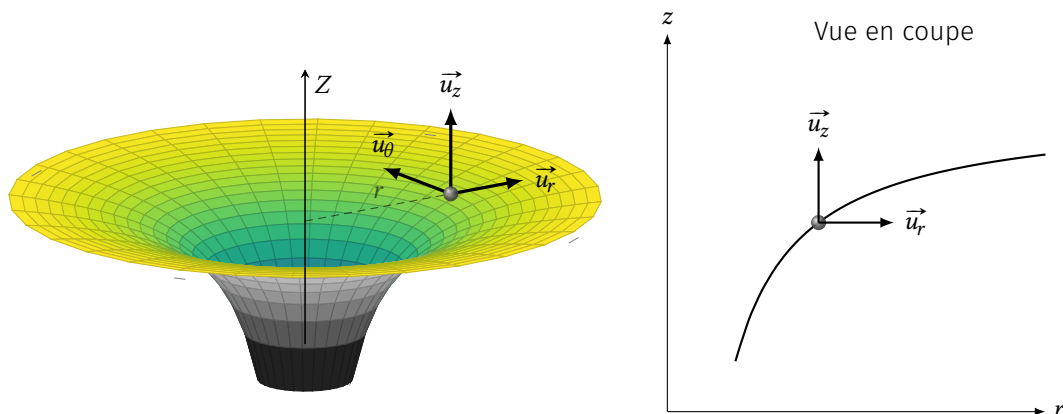
1. Rappeler l'expression de l'énergie potentielle élastique, en précisant la signification des symboles que vous utilisez.
2. Rappeler la définition du moment d'une force  $\vec{T}$  quelconque, s'exerçant sur un point matériel situé en  $P$ , par rapport au point  $G$ .
3. Rappeler la définition du moment cinétique  $\vec{L}_G$  d'un point matériel de masse  $m$ , situé en  $P$ , se déplaçant à la vitesse  $\vec{v}$ , par rapport à un point  $G$ .

Un électron de charge  $-e$  et de masse  $m$  se déplace dans une zone de l'espace soumis à un champ électromagnétique uniforme, où  $\vec{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(-\vec{u}_y + \vec{u}_z)$  et  $\vec{B} = \frac{B_0}{\sqrt{2}}(\vec{u}_y + \vec{u}_z)$ . À l'instant initial, l'électron se déplace à la vitesse  $\vec{v}(0) = v_0\vec{u}_x$ , et il se trouve en  $\vec{r}(0) = \frac{r_0}{\sqrt{3}}(\vec{u}_x + \vec{u}_y + \vec{u}_z)$ . Les constantes  $m, r_0, E_0, B_0, v_0$  et  $e$  sont positives et connues.

4. Exprimer le moment cinétique de l'électron à l'instant initial.
5. Exprimer la force électromagnétique totale qui s'exerce sur l'électron à  $t = 0$ .

## EXERCICE 2 – Problème : plan hyperbolique

Si vous allez à la cité des sciences de la Villette, vous trouverez une expérience d'illustration du mouvement orbital qui s'appelle un orbitogramme. Il s'agit d'une surface au milieu de laquelle se trouve un creux, et sur laquelle vous pouvez lancer une bille en métal, la forme de la surface est telle que les trajectoires suivies par la bille sont similaires à celles d'une planète autour du Soleil. En tout cas, c'est ce que le conservateur du musée vous affirme. Le but de ce problème est de vérifier ses dires.



Une bille considérée comme une masse ponctuelle de masse  $m$  connue roule **sans frottement** sur un plan "hyperbolique" dont l'altitude  $z$  vérifie, en coordonnées cylindriques :

$$z_{plan}(r) = -\frac{A}{r} \quad \text{avec } A = 0.1 \text{ m}^2 \text{ une constante connue}$$

La position de la bille est repérée par le point matériel  $M(r, \theta, z)$ . La dénomination "plan hyperbolique" est imagée, ce n'est pas un plan plat comme d'habitude, c'est une surface courbe.

Vous supposerez que la bille reste toujours en contact avec le plan, et qu'elle subit l'action de son poids  $\vec{P}$ , et de la réaction du plan  $\vec{R} = R_r\vec{u}_r + R_\theta\vec{u}_\theta + R_z\vec{u}_z$  et pas d'autres forces. La constante  $g$  vaut  $10 \text{ m/s}^2$ .

1. Justifiez sans calcul que  $R_\theta = 0$ .

2. En appliquant le PFD, montrer que la quantité  $C \stackrel{\text{def}}{=} r^2 \dot{\theta}$  est constante.

3. On lâche la bille avec une vitesse  $\vec{v}_0 = v_0 \begin{bmatrix} 0.1 \\ 1 \\ 0.01 \end{bmatrix}_{cyl.}$  en  $r_0 = 1$  m, avec  $v_0 = 1 \text{ m s}^{-1}$ . Quelle est la valeur numérique de la constante  $C$ ? **Ne remplacez pas  $C$  par sa valeur numérique dans la suite du problème, sauf lorsqu'on vous demande une valeur numérique.**

4. Exprimer l'énergie cinétique de la bille en fonction de  $r, \dot{r}$ , et  $C$ .

5. Montrer que l'énergie mécanique de la bille peut s'écrire :

$$E_m = \frac{1}{2} m \alpha \dot{r}^2 + E_{p-eff}(r) \text{ avec } \alpha = 1 + \frac{A^2}{r^4} \text{ et } E_{p-eff}(r) = \frac{mC^2}{2r^2} - \frac{mgA}{r}$$

6. Tracer l'allure de  $E_{p-eff}$ .

7. Déterminer le domaine des valeurs possibles de  $r$  selon les valeurs de l'énergie mécanique initiale.

8. À quelle condition sur  $E_{p-eff}$  le mouvement est-il circulaire ? Montrer que la valeur  $r_c$  du rayon de la trajectoire circulaire vaut alors :  $r_c = \frac{C^2}{gA}$
9. Préciser la valeur numérique de  $\alpha$  dans le cas de cette trajectoire.
10. Quelle est l'expression de la vitesse angulaire dans le cas du mouvement circulaire de rayon  $r_c$  ? Donner votre réponse en fonction de  $C$ ,  $g$  et  $A$  Quelle est l'expression de la période de révolution ?

Alors que la bille est en rotation circulaire uniforme de rayon  $r_c$ , on lui donne une pichenette dans la direction  $\vec{u}_r$ . Le rayon de la trajectoire va donc très légèrement varier par rapport à sa position d'équilibre  $r_c$ , mais la bille va revenir vers son rayon d'équilibre et osciller autour. On admet que tout se passe comme si le mouvement était purement radial. Au voisinage de  $r_c$ , l'énergie potentielle efficace peut s'écrire sous la forme :

$$E_{p-eff}(r) \approx \frac{1}{2}k(r - r_c)^2 + \text{cste}$$

11. Déterminer l'expression de  $k$  ?

On admet que dans le cadre de l'approximation faite sur l'énergie potentielle,  $\alpha$  est constant au cours du temps.

12. En tenant compte de l'approximation de la question précédente, et en utilisant la conservation de l'énergie mécanique, montrer que  $r(t)$  vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{r} + \omega_0^2 r = \omega_0^2 r_c \text{ avec } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \frac{(gA)^2}{C^3}$$

On modélise la pichenette par la condition initiale suivante : à  $t = 0$ ,  $r(0) = r_c$  et  $\dot{r}(0) = v_1$ , vitesse connue, faible, c'est à dire négligeable devant une grandeur pour le moment inconnue.

13. En déduire l'expression de  $r(t)$ .
14. En déduire la période des petites oscillations autour de ce rayon d'équilibre. Comparer cette valeur à la période de révolution de la bille autour de l'orbitogramme. Pour quelle valeur de  $\alpha$  est-ce que ces deux valeurs coïncident ?
15. Tracer  $r(t)$  et sur un même graphique, tracer  $\theta(t)$ . En déduire l'allure de la trajectoire de la bille, vue du dessus.

Une trajectoire elliptique peut s'écrire en coordonnées polaires sous la forme  $r(\theta) = \frac{p}{1 - e \sin \theta}$ . Et, pour les faibles valeurs de  $e$ , c'est à dire lorsque  $e < 0.1$ , cette expression devient :  $r(\theta) \approx p(1 + e \sin(\theta))$

16. En déduire que la projection de la trajectoire sur  $OXY$  est une ellipse et donner la valeur de l'excentricité  $e$  de l'ellipse formée par la trajectoire de la bille. Que doit vérifier  $v_1$  pour que toutes ces approximations soient correctes ?