

DM n° 19 de Physique

Induction

Freinage de luge olympique

La luge est devenue un sport olympique en 1964 à Innsbruck (Autriche). Le lugeur est allongé, sur le dos et les pieds en avant, sur la luge qui glisse sur une piste de glace. Les spécialistes peuvent atteindre des vitesses supérieures à $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Pour freiner, le lugeur ne peut compter que sur ses pieds : la luge ne comporte pas de frein...

A Description du dispositif

On considère une luge de masse $m = 100 \text{ kg}$ franchissant la ligne d'arrivée à la vitesse $v_a = 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La piste est horizontale et les frottements sont négligés devant les autres forces en jeu. Le freinage, une fois la ligne d'arrivée passée, doit être rapide. On souhaite donc utiliser la technique du freinage par induction. On fixe alors sous la luge un cadre métallique rigide, conducteur, rectangulaire, de résistance totale $R_c = 1,0 \cdot 10^{-3} \Omega$ et de dimensions $\ell = 55 \text{ cm}$ et $L = 100 \text{ cm}$. Derrière la ligne d'arrivée se trouve une zone de freinage, où règne un champ magnétique \vec{B} vertical ascendant, de norme $B = 1,1 \text{ T}$.

On se donne une base orthonormée directe $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ où \vec{u}_x est colinéaire au mouvement, \vec{u}_z est la verticale ascendante. On nomme M le point central de l'avant du cadre métallique, O le point de passage de M sur la ligne d'arrivée et l'origine des temps $t = 0$ le moment où M passe en O. On note x tel que $\vec{OM} = x \vec{u}_x$.

1. Faire un schéma du cadre et de la zone de freinage dans le plan Oxy , à un instant $t > 0$. Y noter les différentes distances. Matérialiser la zone de freinage par des hachures. Orienter le cadre de façon à compter positivement le flux du champ magnétique.
2. Le champ magnétique a une valeur de $1,1 \text{ T}$. Est-ce élevé ? Quel dispositif pourrait, par exemple, créer un champ de cette intensité ? Quel est l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre ?

B Entrée dans la zone de freinage

Dans la suite, on s'intéresse au mouvement du cadre lorsqu'il n'a pas entièrement pénétré dans la zone soumise à l'influence du champ magnétique \vec{B} . On négligera l'inductance propre du circuit électrique correspondant à l'expérience.

3. Déterminer l'expression du flux magnétique Φ qui traverse le cadre en fonction de x .
4. En déduire la force électromotrice e qui apparaît dans le cadre en fonction de la vitesse v du cadre, de sa largeur ℓ et du champ magnétique B .
5. Représenter le schéma électrique équivalent au cadre rectangulaire.
6. Exprimer l'intensité i induite dans le cadre en fonction de B , ℓ , v et R_c .
7. Définir la force de Laplace. À l'aide d'un schéma, déterminer la résultante \vec{F}_L de la force de Laplace qui s'exerce sur le cadre, en fonction de R_c , v , ℓ et B . Commenter le sens de cette force.
8. Établir l'équation différentielle qui régit l'évolution de la vitesse v de la luge. On définira un temps caractéristique τ , à exprimer en fonction des données du problème.
9. Résoudre cette équation différentielle. En déduire la position $x(t)$ en fonction de t , τ et v_a .
10. Exprimer la durée T_1 que met le cadre pour pénétrer entièrement dans la zone magnétique en fonction de L , τ et v_a . Réaliser l'application numérique.
11. Exprimer (en fonction de L et τ) et calculer la diminution de vitesse $\Delta v_1 = v_a - v(T_1)$ correspondante.
12. Réaliser un bilan énergétique de l'expérience.

C Mouvement dans la zone de freinage

On s'intéresse désormais au mouvement une fois que le cadre a entièrement pénétré la zone de freinage.

13. Que peut-on dire à propos du mouvement lorsque le cadre est entièrement dans la zone soumise au champ magnétique ? En déduire la longueur idéale (minimale) de cette zone.
14. À l'aide d'un schéma, déterminer la résultante \vec{F}_L de la force de Laplace qui s'exerce sur le cadre lorsqu'il sort de la zone soumise au champ magnétique. Exprimer cette force en fonction des données du problème et commenter son sens.
15. Déterminer, sans calculs excessifs, la diminution de vitesse totale $\Delta v_2 = v(T_1) - v(T_2)$ due au passage à travers la zone magnétique. T_2 est l'instant où le cadre est entièrement sorti de cette zone.
16. On installe une alternance de zones magnétiques (de longueur la longueur idéale définie à la question 0.13) et non magnétiques. Combien de zones magnétiques sont nécessaires pour que la vitesse de la luge diminue jusque environ $v_{\min} = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, vitesse à partir de laquelle le lugeur peut freiner avec ses pieds ? Quelle est alors la longueur de la piste de ralentissement ?
17. Donner un autre exemple d'utilisation de freinage par induction. Quel principal avantage cette méthode présente-t-elle ? Quel est son principal inconvénient ?