

? À rendre le mercredi 11 juin 2025  
Devoir Maison n°24

Travail à rendre :

- Les étudiant.e.s à l'aise doivent traiter la totalité du sujet.
- Exercice n°1 : Les questions Q5, Q6, Q10, Q11, Q12, Q13, Q18 sont facultatives pour les étudiant.e.s ayant des difficultés.
- Exercice n°2 : la partie III est facultative pour les étudiant.e.s ayant des difficultés.

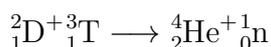
## Exercice n°1 Des plasmas pour la fusion thermonucléaire

- Les questions Q2 à Q7 portent sur le chapitre n°13 « mouvement de particules chargées ». Traitez ces questions en vous appuyant sur votre cours (pas sur internet ou sur le DM déjà fait par un copain), et notamment sur les §I.2, et III.3.
- La question Q12 fait appel aux raisonnements du chapitre n°12, §V.1.c). Traitez cette question en vous appuyant très précisément sur votre cours, notamment pour la rédiger très proprement et rigoureusement.

### Présentation générale

Pour répondre à la raréfaction des énergies fossiles, il est nécessaire de trouver de nouvelles sources d'énergie décarbonées. Parmi celles-ci, la fusion thermonucléaire est une des pistes à long terme qui donne lieu à une coopération internationale sans précédent avec le projet de recherche ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), dont les installations sont implantées à Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône.

La fusion thermonucléaire consiste à faire entrer en collision deux noyaux légers pour obtenir un noyau plus lourd. Cette réaction nucléaire libère de grandes quantités d'énergie du fait qu'une partie de la masse des noyaux est convertie en énergie. Les efforts de recherche portent actuellement sur une réaction nucléaire impliquant deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium  ${}^2_1\text{D}$  et le tritium  ${}^3_1\text{T}$ . La réaction nucléaire produit un noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  et un neutron selon l'équation de réaction :



Dans un réacteur de fusion, la matière est à l'état de plasma. On appelle plasma un état de la matière constitué d'ions, d'électrons libres et d'espèces neutres. Cet état résulte des très hautes températures atteintes dans le réacteur qui permettent l'ionisation des atomes.

Ce sujet aborde quelques aspects de la physique des plasmas dont la compréhension est essentielle pour la maîtrise de la fusion contrôlée. Dans la partie I, on s'intéressera au confinement magnétique du plasma de fusion dans le réacteur par l'étude du mouvement d'une particule chargée de ce plasma dans un champ magnétique. Dans la partie II, on envisagera le chauffage ohmique par induction pour atteindre les températures nécessaires pour initier les réactions de fusion.

Les deux parties de ce problème sont indépendantes.

Données numériques

- Permittivité diélectrique du vide :  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
- Perméabilité magnétique du vide :  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$
- Charge élémentaire :  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Masse de l'électron :  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Constante de Boltzmann :  $k_B = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

## I Confinement magnétique du plasma

Les plasmas créés pour réaliser la fusion thermonucléaire ayant des températures extrêmement élevées, ceux-ci ne peuvent être au contact direct de la paroi du réacteur qui fondrait ou serait fortement endommagée. Pour contenir ces plasmas, on doit donc réaliser un confinement immatériel : la méthode la plus étudiée à ce jour est le confinement magnétique. On se propose dans cette partie d'en comprendre le principe par l'étude du mouvement d'une unique particule chargée au sein du plasma : un cation de masse  $m$  et de charge électrique  $+e$  (le cas d'un électron se traitant de manière similaire). On supposera que seule la force magnétique agit sur le cation et qu'aucune collision n'a lieu avec les autres espèces présentes dans le plasma.

### I.1 Confinement d'une particule chargée dans un champ magnétique stationnaire et uniforme

Le champ magnétique nécessaire au confinement du plasma est créé par un solénoïde d'axe  $(Oz)$  orienté par le vecteur unitaire  $\vec{u}_z$ , constitué de  $N$  spires de rayon  $a$ , régulièrement réparties sur une longueur  $d \gg a$ . Toutes les spires sont parcourues par un courant d'intensité  $I$  constante (figure 1).

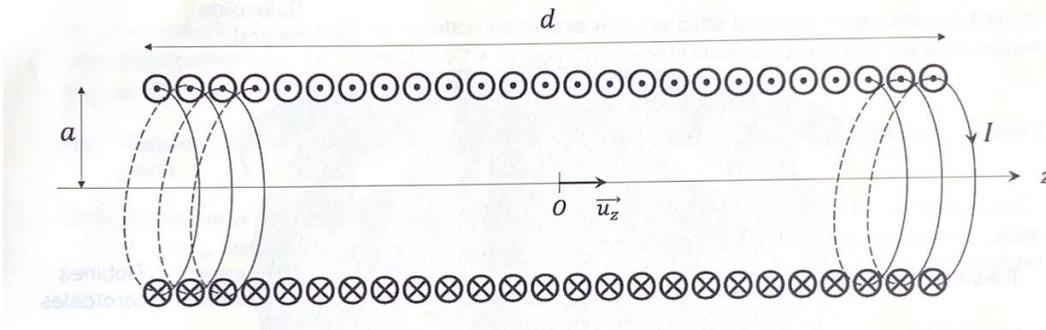


FIGURE 1 – Schéma du solénoïde. Seules quelques spires sont représentées par souci de lisibilité.

Q1. En étudiant les symétries et invariances de la distribution de courant ci-dessus, déterminer la direction du champ magnétique et la variable d'espace dont dépend sa composante.

On s'intéresse maintenant au mouvement d'un cation de masse  $m$  et de charge électrique  $+e$  à l'intérieur de ce solénoïde, soumis au champ  $\vec{B} = B_0 \vec{u}_z$ .

Q2. Montrer que la puissance de la force magnétique est nulle. En déduire que l'énergie cinétique du cation se conserve. Par la suite, on notera  $v_0$  la norme constante de la vitesse du cation au cours de son mouvement.

On suppose d'abord que le cation a un mouvement dans un plan perpendiculaire au champ magnétique  $\vec{B} = B_0 \vec{u}_z$ .

Q3. Représenter sur un schéma le vecteur vitesse  $\vec{v}$  du cation, le vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  perpendiculaire au plan de la feuille et la force magnétique  $\vec{F}_m$ . Esquisser la courbure de la trajectoire puis représenter les vecteurs unitaires du repère de Frenet.

Q4. Donner l'expression de l'accélération du cation dans le repère de Frenet en fonction de sa vitesse  $v_0$  et du rayon de courbure  $r$  de la trajectoire.

Montrer que la trajectoire du cation est circulaire, de rayon  $r_L = \frac{v_0}{\omega_c}$  appelé rayon de Larmor, avec  $\omega_c = \frac{eB_0}{m}$  la pulsation cyclotron.

On suppose maintenant que le cation possède une vitesse initiale  $\vec{v}_0$  parallèle au champ magnétique  $\vec{B} = B_0 \vec{u}_z$ .

Q5. En projetant le principe fondamental de la dynamique selon  $\vec{u}_z$ , montrer que la composante  $v_z$  de la vitesse du cation selon  $\vec{u}_z$  est constante. En déduire que le mouvement est rectiligne. Peut-on affirmer que le cation est confiné ?

Pour une vitesse initiale quelconque du cation, le mouvement est une combinaison du mouvement circulaire perpendiculaire au champ magnétique et du mouvement rectiligne parallèle au champ magnétique : la trajectoire est alors hélicoïdale.

Q6. Actuellement, la majorité des recherches sur le confinement magnétique portent sur les tokamaks, pour lesquels les bobines produisant le champ magnétique ne forment pas un cylindre (comme pour le solénoïde) mais un tore (figure 2), qui est un cylindre refermé sur lui-même. Le confinement magnétique du plasma est donc assuré par les bobines toroïdales (le rôle du solénoïde central sera étudié dans la sous-partie II.2). Quelle raison a conduit à retenir une géométrie toroïdale ?

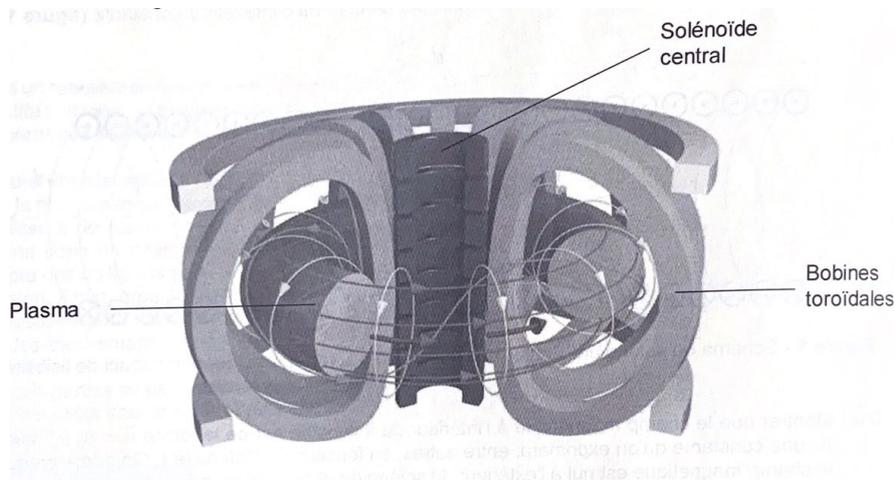


FIGURE 2 – Schéma d'un tokamak

Q7. Calculer le rayon de Larmor d'un cation d'hélium  ${}^4_2\text{He}^+$  (masse  $m = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ) de vitesse  $v_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  dans le tokamak d'ITER produisant un champ magnétique  $B_0 = 12 \text{ T}$ .  
Commenter, sachant que les rayons internes des bobines toroïdales sont de 2 m à l'horizontale et de 34 m à la verticale.

## I.2 Bouteille magnétique

Lors des premières recherches sur la fusion contrôlée, il a été envisagé de confiner le plasma à l'aide d'une « bouteille magnétique », qui est un solénoïde dont le rayon des spires diminue lorsqu'on se rapproche de ses bords. L'allure des lignes de champ dans une bouteille magnétique est représentée sur la figure 3.

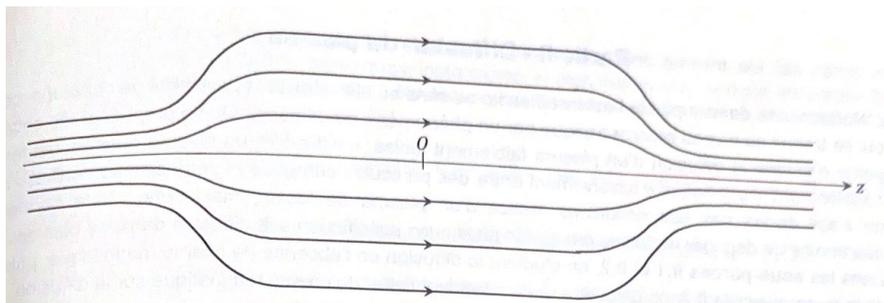


FIGURE 3 – Lignes de champ d'une bouteille magnétique

Q8. Comment évolue qualitativement l'intensité du champ magnétique lorsqu'on se rapproche des bords de la bouteille magnétique (c'est-à-dire lorsque  $|z|$  augmente) ? Représenter graphiquement l'allure de la norme du champ magnétique  $B(z)$  sur l'axe  $(Oz)$ .

On s'intéresse au mouvement d'un cation de masse  $m$  dans cette bouteille magnétique autour de l'axe  $(Oz)$ . Son vecteur vitesse est  $\vec{v} = \vec{v}_\perp + \vec{v}_\parallel$ , où  $\vec{v}_\perp$  désigne la vitesse dans le plan perpendiculaire à  $\vec{u}_z$ , et  $\vec{v}_\parallel$  la vitesse selon  $\vec{u}_z$ .

Q9. Rappeler, schéma à l'appui, la définition du moment magnétique  $\vec{\mu}$  d'une boucle de courant plane.

Q10. Au voisinage de l'axe  $(Oz)$ , le champ magnétique est localement uniforme et orienté selon  $\vec{u}_z$  :  $\vec{B} = B\vec{u}_z$ . Dans cette question, on suppose comme dans la Q4 que le mouvement du cation est circulaire, uniforme et de vitesse  $v_\perp$ , perpendiculairement au champ magnétique.

Montrer que le moment magnétique  $\vec{\mu}$  associé au cation a pour expression :

$$\vec{\mu} = -\frac{mv_{\perp}^2}{2B}\vec{u}_z.$$

L'expression du moment magnétique établie à la Q10 reste en première approximation valable malgré les déplacements du cation selon l'axe ( $Oz$ ). En outre, on peut montrer que ce moment magnétique reste constant au cours du mouvement. Ainsi, le cation peut être assimilé à un dipôle magnétique rigide se déplaçant selon l'axe ( $Oz$ ), auquel on associe une énergie potentielle de la forme  $E_p = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ .

Q11. Montrer que  $E = \frac{1}{2}mv_{\parallel}^2 + E_p$  est une constante. Quelle signification physique peut-on donner aux termes  $\frac{1}{2}mv_{\parallel}^2$  et  $E$  du point de vue du dipôle magnétique ?

Q12. Tracer l'allure de  $E_p(z)$ . Discuter qualitativement les différents mouvements possibles du cation dans la bouteille magnétique en fonction de la valeur de  $E$  (états libres ou états liés). Dans quel cas peut-on dire que la bouteille magnétique se comporte comme un « miroir magnétique », c'est-à-dire que le cation repart dans la direction opposée sur les bords de la bouteille ?

Q13. Quel défaut présente la bouteille magnétique pour le confinement du plasma ?

## II Échauffement du plasma

Pour rendre possible la fusion, il faut vaincre la barrière coulombienne qui s'oppose au rapprochement des deux noyaux d'hydrogène. C'est la raison pour laquelle il est préalablement nécessaire d'échauffer le plasma jusqu'à ce que les réactions de fusion s'initient. L'objectif est ensuite d'atteindre le seuil d'ignition, c'est-à-dire le moment où l'énergie libérée par les réactions de fusion suffit à maintenir la température nécessaire à la fusion.

### II.1 Température à atteindre pour initier la fusion

### II.2 Chauffage ohmique par induction

Dans les tokamaks (figure 2), une partie de l'échauffement est réalisé par induction. Un solénoïde situé au centre du tokamak produit un champ magnétique  $\vec{B}_1$  dépendant du temps. Le plasma, de géométrie torique, entoure ce solénoïde central : il est alors parcouru par un intense courant induit qui, par effet Joule, chauffe le plasma. On se propose de modéliser sommairement cette situation.

On se place en coordonnées cylindriques ( $r, \theta, z$ ) d'axe ( $Oz$ ). Le solénoïde central d'axe ( $Oz$ ), de rayon  $a_1$ , est parcouru par un courant  $i_1(t)$  qui génère un champ magnétique  $\vec{B}_1(r, t)$ , tel que  $\vec{B}_1(r < a_1, t) = \beta i_1(t)\vec{e}_z$  (avec  $\beta$  constant) et  $\vec{B}_1(r > a_1, t) = \vec{0}$ . Le plasma est assimilé à une boucle de courant filiforme parcourue par  $i_2(t)$ , de même axe que le solénoïde central et de rayon  $a_2 > a_1$  (figure 4).

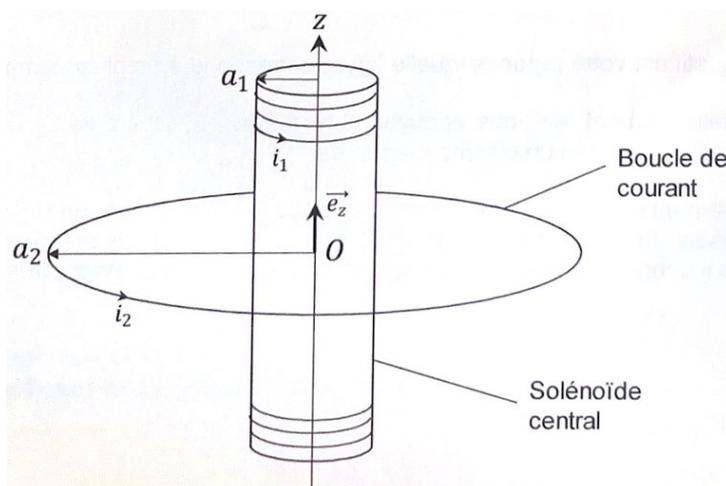


FIGURE 4 – Représentation schématique du système solénoïde central – plasma dans le tokamak

Q14. Exprimer l'inductance mutuelle  $M$  entre le solénoïde central et la boucle de courant, en fonction de  $\beta$  et  $a_1$ . Calculer  $M$  pour le tokamak ITER, sachant que  $a_1 = 2$  m et que le champ magnétique au centre du solénoïde est de 13 T pour un courant maximal de 46 kA.

On modélise l'interaction entre le solénoïde et le plasma par le circuit électrique représenté figure 5.

Le solénoïde central, d'inductance propre  $L_1$  et de résistance  $R_1$ , est parcouru entre  $t = 0$  et  $t = t_1$  par le courant  $i_1(t) = I_0 \times \left(1 - \frac{t}{t_1}\right)$  avec  $I_0$  et  $t_1$  des constantes.

La boucle de courant représentant le plasma a pour résistance  $R_2$  et pour inductance propre  $L_2$ ; elle est parcourue par le courant  $i_2(t)$ .

À  $t < 0$ , le courant  $i_2$  est nul.  $M$  est l'inductance mutuelle entre les deux circuits.

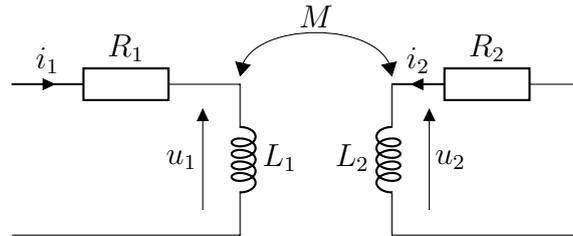


FIGURE 5 – Circuit équivalent au système solénoïde central – plasma

Q15. Montrer que  $i_2(t)$  vérifie l'équation différentielle :

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{i_2}{\tau_2} = \frac{I_0}{\tau_1}$$

avec  $\tau_1$  et  $\tau_2$  qui seront exprimés en fonction de  $L_2, R_2, M$  et de  $t_1$ .

Q16. En déduire  $i_2(t)$ . En supposant  $t \ll \tau_2$ , simplifier cette expression par un développement limité au premier ordre en  $t/\tau_2$ .

Q17. Exprimer l'énergie reçue par  $R_2$  entre  $t = 0$  et  $t = t_1$  en fonction de  $R_2, L_2, M, I_0$  et de  $t_1$ , en supposant que  $t_1 \ll \tau_2$ . Quel est l'effet de cette énergie sur le plasma ?

Q18. Le physicien américain Lyman Spitzer a établi en 1950 que la résistivité  $\rho$  d'un plasma soumis à un champ magnétique dépendait de la température  $T$  du plasma proportionnellement à  $T^{-3/2}$ . À partir de cette information, quelle critique peut-on émettre sur la modélisation effectuée dans cette partie ?

## Exercice n°2 Freinage d'une luge par induction

### I Description du dispositif

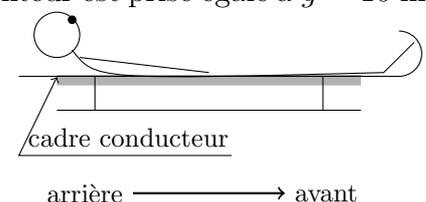
La luge est devenue un sport olympique en 1964 à Innsbruck (Autriche). Le lugeur est allongé, sur le dos et les pieds en avant, sur la luge qui glisse sur une piste de glace. Pour freiner, le lugeur ne peut compter que sur ses pieds car la luge ne comporte pas de frein. Les spécialistes peuvent atteindre des vitesses supérieures à 100 km/h. La luge franchit la ligne d'arrivée à la vitesse  $v_a = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

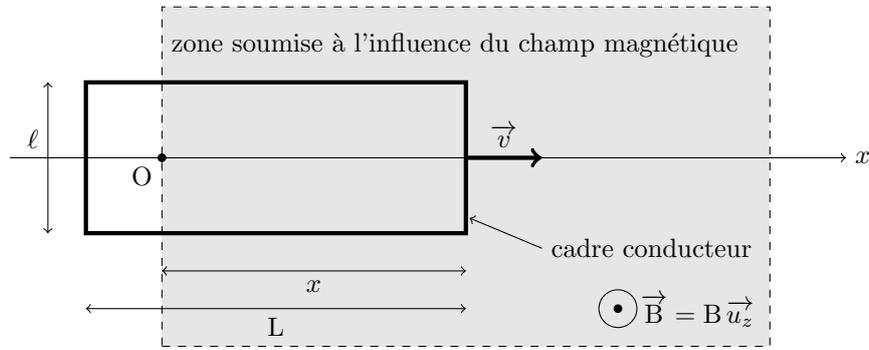
Les frottements sont négligés devant les autres forces en jeu.

L'ensemble {luge+lugeur} (désigné par la suite sous le terme simple de luge) est de masse  $m = 100$  kg. La piste est considérée comme un référentiel galiléen. L'accélération de la pesanteur est prise égale à  $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

On fixe sous la luge un cadre métallique rigide, conducteur, rectangulaire, de résistance totale  $R_c = 10^{-3} \Omega$  et de côtés  $\ell \times L$  ( $\ell = 50,0$  cm et  $L = 100$  cm).

La piste est horizontale et le long de l'axe  $Ox$ , dont l'origine  $O$  est fixée sur la ligne d'arrivée, avant la zone de freinage. L'origine des temps est également fixée au passage de la ligne d'arrivée.





Cadre conducteur entrant dans la zone magnétique

L'axe  $Oz$  désigne la verticale ascendante.

Un dispositif crée un champ magnétique  $\vec{B} = B\vec{u}_z$  ( $B = 1,00$  T) sur toute la piste de décélération.

Q1. Analyser physiquement ce qu'il va se passer. Détailler les phénomènes mis en jeu. Décrire notamment les différentes phases du mouvement de la luge depuis la ligne d'arrivée jusqu'à ce qu'elle ait franchi complètement la zone soumise au champ magnétique, supposée ici d'une longueur supérieure à  $L$ .

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  $\vec{B}$ .

## II Mise en équation

Q2. Exprimer le flux du champ magnétique  $\vec{B}$  à travers le cadre, en fonction de  $B$ ,  $x$  et  $\ell$ .

Q3. Exprimer la force électromotrice  $e$  qui apparaît dans le cadre en fonction de la vitesse  $v$  du cadre, de sa largeur  $\ell$  et du champ magnétique  $B$ .

Q4. On note  $R_c$  la résistance totale du cadre et on néglige l'inductance propre du cadre.

Établir l'équation électrique.

Q5. Établir l'expression de la résultante de la force de Laplace  $\vec{F}_{\mathcal{L}}$  qui s'exerce sur le cadre, en fonction de l'intensité  $i$ ,  $\ell$ ,  $B$  et d'un vecteur unitaire.

Q6. Établir l'équation mécanique du problème.

Q7. Établir l'équation différentielle vérifiée par la vitesse et l'écrire sous la forme

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = 0$$

en exprimant  $\tau$  en fonction de  $m$ ,  $B$ ,  $\ell$  et  $R_c$ . Faire l'application numérique de  $\tau$ .

Q8. Résoudre complètement l'équation différentielle.

Q9. Établir le bilan de puissance de la conversion. Identifier et interpréter les différents termes. Comparer la puissance de la force de Laplace et celle de la fem induite.

## III Distance de freinage

Q10. Exprimer la position  $x(t)$  de la luge en fonction de  $t$ ,  $\tau$  et  $v_a$ .

Q11. Calculer la durée  $T$  que met le cadre de longueur  $L$  pour pénétrer entièrement dans la zone magnétique.

Q12. En déduire l'expression de  $v(T)$ .

Calculer numériquement la variation  $\Delta v = v_a - v(T)$  de vitesse de la luge entre les instants  $t = 0$  et  $T$ .

Q13. Quelle est la vitesse de la luge une fois que le cadre est entièrement dans la zone soumise au champ magnétique? Justifier. En déduire la longueur idéale de la zone soumise au champ magnétique.