

DS n°5 - CCINP-e3a (Samedi 24 janvier 2026 - Durée 4h)

1 Étude d'un cyclotron

Données générales pour l'exercice :

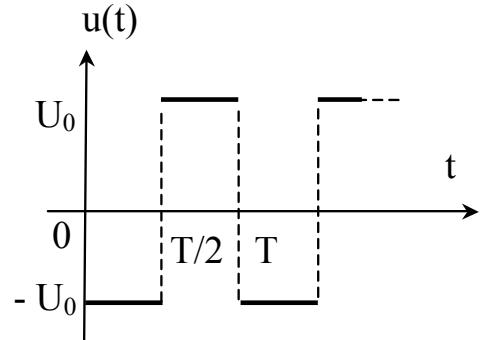
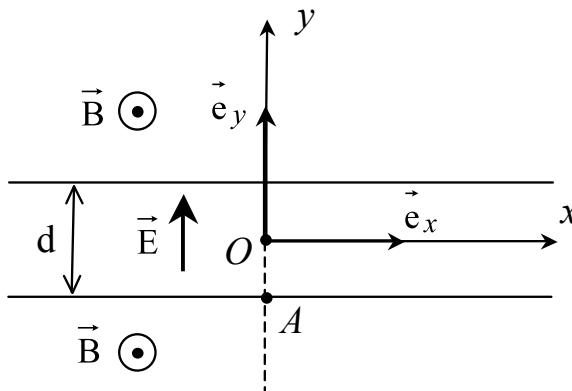
masse d'un proton : $m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg

Charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

Dans tout l'exercice, le référentiel d'étude est supposé galiléen et il est muni d'un repère ($Oxyz$).

Un cyclotron est un appareil destiné à produire des particules de grande énergie. Elles y sont soumises à l'action conjuguée d'un champ électrique \vec{E} accélérateur et d'un champ magnétique \vec{B} déviateur de la trajectoire, tous les deux uniformes.

- Le champ magnétique $\vec{B} = B \vec{e}_z$ ($B > 0$) est permanent et il est dirigé suivant l'axe Oz du repère ($Oxyz$). Il existe dans tout l'espace, à l'exception d'une petite zone comprise entre deux plans parallèles, définis par $y = -\frac{d}{2}$ et $y = \frac{d}{2}$, distants de d (voir figure).
- Le champ électrique est de la forme $\vec{E} = -\frac{u(t)}{d} \vec{e}_y$ où $u(t)$ est une tension périodique, de période T , représentée sur la figure ci-dessous. Ce champ n'existe qu'à l'intérieur de la petite zone définie par $-\frac{d}{2} < y < \frac{d}{2}$ et il est nul partout ailleurs.



On étudie le mouvement d'un proton de masse m et de charge e placé dans le cyclotron. À l'instant $t = 0$, il se trouve au point $A(0, -d/2, 0)$ avec une vitesse nulle.

1. On suppose que $u(t) = -U_0$ durant la première phase du mouvement.

- Déterminer la vitesse v_1 ainsi que la date t_1 lorsque le proton entre dans la zone où règne le champ magnétique.
- Quelle est la condition sur T pour que le champ électrique reste constant durant cette première phase d'accélération ? En déduire la valeur minimale U_{min} de U_0 , en fonction de m , e , d et T .

Dans la suite de l'exercice, on supposera que $U_0 \gg U_{min}$ et on négligera le temps de transfert du proton à l'intérieur de la zone d'accélération devant celui passé dans la zone où règne le champ magnétique. En particulier cela signifie que, à l'issue de sa première phase d'accélération, le proton arrive en $y = d/2$ à l'instant $t = t_1 \approx 0$.

2. a) Montrer que l'énergie cinétique E_C du proton est une constante du mouvement au cours de son transit dans la zone où règne le champ magnétique.
- b) Déterminer les coordonnées $x(t)$ et $y(t)$ de la particule à l'instant t .
- c) On désigne par S le point où le proton sort de cette zone. Déterminer la date t_S à laquelle le proton arrive en S ainsi que les coordonnées (x_S, y_S) de ce point.

3. a) De façon générale, quel est le rayon R de la trajectoire dans la zone où règne le champ magnétique lorsque la vitesse du proton a pour norme v ?
- b) Montrer que l'intervalle de temps Δt qui sépare deux accélérations consécutives s'écrit : $\Delta t = \frac{m\pi}{eB}$. Quelle condition doit satisfaire la période T de la tension $u(t)$ pour que le proton soit toujours accéléré dans la zone où règne le champ électrique \vec{E} ?

On suppose que cette condition est réalisée.

- c) Montrer qu'après n accélérations, la vitesse du proton vaut :

$$v_n = \sqrt{n} \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$$

4. Compte tenu des contraintes de construction du cyclotron, le rayon maximal de la trajectoire vaut $R_{max} = 80$ cm. Lorsque cette valeur est atteinte, le proton est éjecté hors de l'appareil. Déterminer la vitesse v_{ej} du proton à la sortie du cyclotron en fonction de R_{max} , e , m et B . En déduire le nombre N de tours effectués avant son éjection de l'appareil.

Application numérique : $B = 0,52$ T ; $U_0 = 1,0$ kV. Calculer v_{ej} et N .

2 La structure interne de Jupiter

Électrostatique et gravitation universelle

On notera dans toute la suite \mathcal{G} la constante de la gravitation universelle dont la valeur numérique est fournie en fin de sujet. On s'intéresse au champ gravitationnel $\overrightarrow{G(P)}$ créé en P par une distribution de masse.

Une distribution de masse volumique ρ crée un champ gravitationnel \vec{G} (supposé stationnaire) qui satisfait les équations locales suivantes :

$$\text{div } \vec{G} = -4\pi\mathcal{G}\rho \quad \text{et} \quad \vec{\text{rot}} \vec{G} = \vec{0} \quad (1)$$

- Q16. Comment s'exprime la force de gravitation exercée par une distribution de masse sur un point matériel P de masse m en fonction du champ de gravitation $\overrightarrow{G(P)}$?
- Q17. Dresser une analogie entre les équations (1) et celles de l'électrostatique. Quelle est la différence fondamentale entre l'électrostatique et la gravitation ?

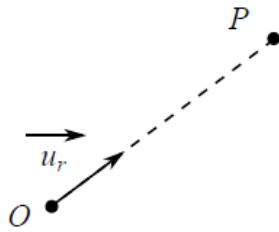


FIGURE 1 – Paramétrage

- Q18. Le potentiel gravitationnel Φ est pour \vec{G} l'analogie de ce qu'est le potentiel électrostatique V pour le champ électrostatique. Laquelle des deux équations précédentes (1) permet d'assurer l'existence d'un potentiel gravitationnel Φ pour le champ de gravitation \vec{G} ? Écrire l'équation existant entre Φ et \vec{G} , au signe près. En déduire que le potentiel gravitationnel satisfait l'équation de Poisson et préciser alors le choix du signe effectué :

$$\Delta\Phi = 4\pi G \rho$$

- Q19. Énoncer le théorème de Gauss liant le champ électrostatique \vec{E} à la distribution volumique de charge ρ . En s'appuyant sur l'analogie établie entre l'électrostatique et la gravitation, montrer que le champ gravitationnel \vec{G} créé par une distribution de masse volumique ρ satisfait la relation (2), M_{int} étant la masse contenue à l'intérieur de la surface fermée Σ ,

$$\oint\!\!\!\oint_{M \in \Sigma} \overrightarrow{G(M)} \cdot \overrightarrow{dS_M} = -4\pi G M_{\text{int}} \quad (2)$$

Distribution sphérique de masse non homogène

Lancée en 2011 depuis la Terre, la sonde baptisée "Juno" restera en orbite autour de Jupiter jusqu'au mois de juillet 2021.

En étudiant les variations du champ de gravitation de Jupiter, la sonde Juno a pour but de fournir des indications sur la distribution des masses à l'intérieur de la planète, l'incidence sur celle-ci du déplacement de son atmosphère et du mouvement de marée généré par ses lunes.

De manière générale, les planètes géantes possèdent :

- un noyau d'éléments lourds ;
- une enveloppe d'hydrogène et d'hélium ;
- au-delà d'une pression donnée, l'hydrogène devient métallique.

On étudie ici quelques propriétés du champ de gravitation d'une distribution sphérique de masse non-homogène de rayon R . On associe un système de coordonnées sphériques à cette distribution dont le centre O est à l'origine du système. On notera $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\phi)$ la base de vecteurs associée. On suppose que la masse volumique $\rho(r)$ ne dépend que de la coordonnée radiale r .

- Q20. Justifier très précisément que le champ de gravitation est nécessairement de la forme $\overrightarrow{G(M)} = -G(r)\vec{u}_r$, où $G(r)$ est la norme du champ de gravitation.
- Q21. On note $M(r)$ la masse contenue dans la boule de rayon r . Montrer alors que :

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 \rho(r') dr'$$

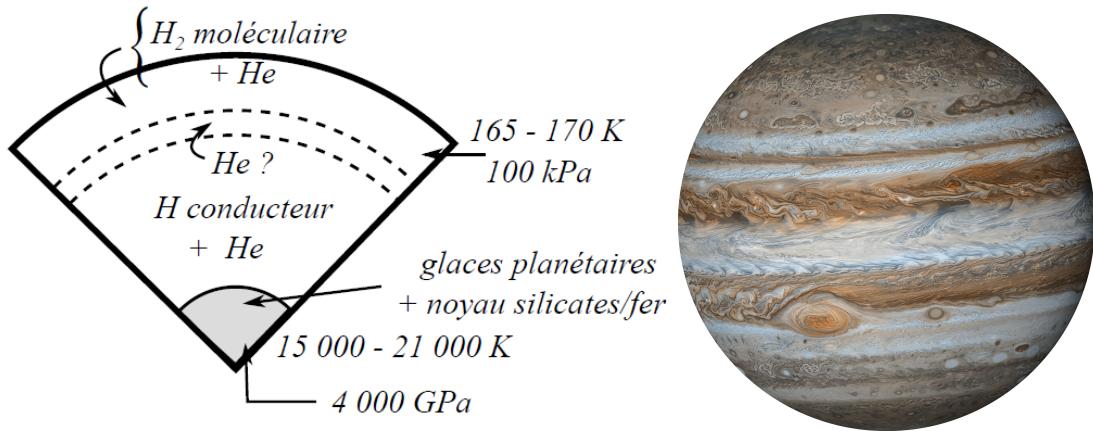


FIGURE 2 – Structure interne de Jupiter - (J. Heyvaerts - Astrophysique)

Q22. En utilisant le théorème de Gauss pour la gravitation, déterminer dans le cas de ce modèle $G(r)$ pour $r > R$. On rappelle que M_J est la masse de Jupiter que l'on définira à l'aide de $M(r)$. Tracer le graphe de $r \mapsto G(r)$ pour $r > R$.

Donner l'expression du potentiel gravitationnel $\Phi(r)$ dont dérive le champ de gravitation pour $r > R$ en le prenant nul à l'infini.

Dans le référentiel jupitercentrique supposé galiléen, Jupiter est animée d'un mouvement de rotation supposé uniforme autour de l'axe polaire (Oz), la période associée à ce mouvement de rotation valant $T_{\text{sid}} = 0,41$ jour terrestre. Chaque volume élémentaire $d\tau$ de l'atmosphère de Jupiter, de centre P, immobile dans le référentiel lié à Jupiter et de masse δm possède donc, dans ce référentiel, un mouvement de rotation circulaire uniforme de vitesse angulaire ω_{sid} . L'origine du repère est choisie au centre de Jupiter qui présente une symétrie de révolution autour de l'axe passant par les pôles (Oz) (mais qui n'est plus supposée sphérique).

Q23. Exprimer, en fonction de ses deux coordonnées sphériques r et θ et de ω_{sid} , le vecteur accélération du centre P du volume élémentaire $d\tau$ dans le référentiel jupitercentrique.

Q24. Jupiter possède la forme d'un ellipsoïde de révolution. Le rayon polaire possède la valeur $R_P = 6,68 \cdot 10^4$ km et le rayon équatorial possède la valeur $R_E = 7,15 \cdot 10^4$ km. Comment expliquer simplement la forme de cette planète ?

On définit l'aplatissement relatif ε par $\varepsilon = \frac{R_E - R_P}{R_E}$. Du fait de l'aplatissement de Jupiter, le potentiel gravitationnel à grande distance a pour expression, avec $K = \frac{I_J}{M_J R_J^2}$ où I_J est le moment d'inertie diamétral qu'aurait Jupiter, de masse M_J et de rayon R_J , sans rotation propre (donc sans le phénomène d'aplatissement),

$$\Phi(r, \theta) = \frac{\mathcal{G}M_J}{r} \left[-1 + \frac{\varepsilon K}{2} \left(\frac{R_J}{r} \right)^2 (3 \cos^2 \theta - 1) \right]$$

On donne la valeur du moment d'inertie diamétral d'une boule pleine, de rayon R et masse volumique uniforme ϱ : $I = \frac{8\pi}{15} \varrho R^5$.

Q25. Si Jupiter était assimilable en l'absence de rotation propre à une boule pleine, homogène, de masse volumique uniforme, quelle devrait être la valeur de la constante $K = \frac{I_J}{M_J R_J^2}$?

Q26. L'étude du champ de gravitation par la sonde Juno permettra l'estimation de la constante K . En quoi la connaissance de K est-elle intéressante ?

Les couches supérieures de l'atmosphère de Jupiter sont riches en hélium et dihydrogène gazeux. On considère alors une région de l'atmosphère de Jupiter à une température T . Soit dN le nombre d'entités (atomes ou molécules) de masse m dont le module de la vitesse est compris entre v_r et $v_r + dv_r$. On suppose une distribution telle que :

$$\frac{dN}{N} = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv_r^2}{2k_B T} \right) \times 4\pi v_r^2 dv_r = f(v_r) dv_r$$

- Q27. Calculer la valeur de v_r qui rend $f(v_r)$ maximale. On l'appelle vitesse la plus probable d'agitation thermique et on la note v_c .
- Q28. Expliquer alors pourquoi, contrairement à l'atmosphère terrestre, l'atmosphère de Jupiter peut être riche en dihydrogène ou hélium. On pourra comparer les valeurs des vitesses de libération de la Terre et de Jupiter, en assimilant ces astres à des corps sphériques.

Document - Données

Notations et valeurs numériques

Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Masses molaires (en g·mol ⁻¹)	$\mathcal{M}_{\text{H}} = 1,0 ; \mathcal{M}_{\text{He}} = 4,0 ; \mathcal{M}_{\text{Ge}} = 72,6$
Numéros atomiques	$Z(O) = 8$ et $Z(S) = 16$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante de la gravitation universelle	$\mathcal{G} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
Accélération de la pesanteur terrestre	$g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
Pouvoir de résolution de l'œil	$\varepsilon_{\text{œil}} = 1,5'$
Conversion	$1^\circ = 60'$ (minutes d'angle)
Masse de la Terre	$M_T = 6,0 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Masse de Jupiter	$M_J = 1,97 \cdot 10^{27} \text{ kg}$
Rayon de la Terre	$R_T = 6,4 \cdot 10^3 \text{ km}$
Rayon de Jupiter	$R_J = 7,0 \cdot 10^4 \text{ km}$
Rayon de l'orbite terrestre	$d_T = 1,50 \cdot 10^8 \text{ km}$
Rayon de l'orbite de Jupiter	$d_J = 7,80 \cdot 10^8 \text{ km}$
Période de révolution sidérale de la Terre	$T_T = 365,25 \text{ jours}$

Une formule d'analyse vectorielle

On considère le champ scalaire suivant : $f : \mathbb{R}^3 \longrightarrow \mathbb{R}$. Alors : $\Delta f = \operatorname{div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}} f)$

Opérateur gradient en coordonnées sphériques

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}} f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \\ \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \phi} \end{pmatrix}_{\mathcal{B}(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\phi)}$$

3 Moteur synchrone

Formulaire et donnée générale :

$$\cos(a)\cos(b) = \frac{\cos(a+b) + \cos(a-b)}{2} \quad \text{et} \quad \sin(a)\cos(b) = \frac{\sin(a+b) + \sin(a-b)}{2}$$

Perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Partie I. – Structure du champ magnétique produit par des bobines

On considère un solénoïde d'axe (Oz), composé de spires jointives circulaires de rayon R , identiques et parcourues par un courant d'intensité I constante. On suppose que les spires sont jointives et on note n le nombre de spires par mètre.

1. On se place dans le modèle du solénoïde de longueur infinie. Déterminer le champ magnétique $\vec{B}(M)$ créé en tout point M intérieur au solénoïde. On supposera que le champ magnétique est nul à l'extérieur du solénoïde. Comment qualifier le champ magnétique dans le solénoïde ?
2. On considère maintenant une région de l'espace sans courants, dans laquelle le champ magnétique en tout point M de coordonnées cartésiennes (x, y, z) s'écrit sous la forme :

$$\vec{B}(M) = B(x, y, z) \vec{e}_z$$

- a) Dessiner l'allure des lignes de champ.
- b) Montrer à l'aide des équations locales de la magnétostatique que \vec{B} est uniforme dans cette région de l'espace.

On considère maintenant une bobine composée de N spires jointives circulaires identiques de rayon R , d'axe (Oz) et de longueur finie ℓ . Toutes les spires sont parcourues par le même courant d'intensité constante I ; l'origine O est au centre de la bobine.

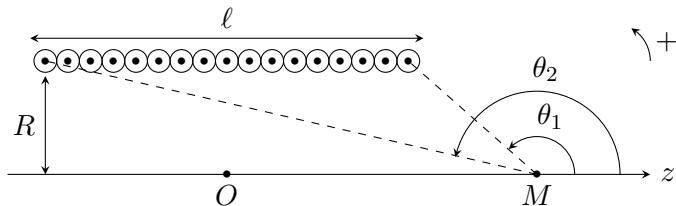


Figure 1

L'expression du champ magnétique $\vec{B}(M)$ créé par la bobine en un point M de l'axe (Oz) est donnée par :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 N I}{2\ell} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \vec{e}_z$$

où θ_1 et θ_2 sont les angles orientés indiqués sur la figure 1, le sens d'orientation + étant le sens trigonométrique (cf. figure 1).

- a) Justifier par les symétries que $\vec{B}(M)$ est colinéaire à \vec{e}_z .

- b) Indiquer comment on peut retrouver l'expression du champ magnétique créé par un solénoïde de longueur infinie obtenue à la question 1.
- c) Le point M étant d'abscisse z , déterminer l'expression de $\vec{B}(M)$ en fonction de z , R , ℓ , N , I et μ_0 .
- d) En déduire $\vec{B}(O)$. Application numérique : on prend $\ell = 7$ cm, $R = 4$ cm et $N = 1000$ (bobine usuelle de laboratoire). Calculer la valeur de I permettant d'avoir $\|\vec{B}(O)\| = 100$ mT. Commenter. Indiquer quel(s) problèmes sont susceptibles de se poser et les solutions techniques qu'on peut y apporter.

Pour la valeur de l'intensité I obtenue, calculer la valeur de $\|\vec{B}\|$ en un point M situé à $z = 10$ cm du centre O .

On étudie maintenant le champ magnétique créé en un point M situé en dehors de l'axe (Oz). On utilise les coordonnées cylindriques (r, θ, z) et la base cylindrique $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$.

Pour tout champ vectoriel $\vec{A} = A_r \vec{e}_r + A_\theta \vec{e}_\theta + A_z \vec{e}_z$, on donne :

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

et

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\theta + \left(\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \right) \vec{e}_z$$

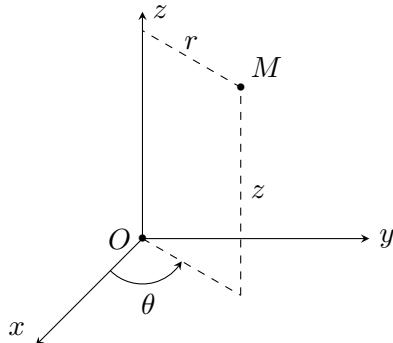


Figure 2 Coordonnées cylindriques

Le champ magnétique en M s'écrit à priori :

$$\vec{B}(M) = B_r \vec{e}_r + B_\theta \vec{e}_\theta + B_z \vec{e}_z$$

3. a) Montrer que $B_\theta = 0$ et que $B_r = B_r(r, z)$ et $B_z = B_z(r, z)$.
- b) Établir que la composante $B_z(r, z)$ est une fonction paire de z .
- c) Existe-t-il des lignes de champ magnétique contenues dans le plan xOy ?
- d) On admet que pour un point M de coordonnées cylindriques (r, θ, z) très proche du point O , les composantes $B_z(M)$ et $B_r(M)$ ont pour expressions approchées :

$$B_z(z, r) \approx B(O) \left[1 - \frac{z^2}{D^2} \right] \quad \text{et} \quad B_r(z, r) \approx B(O) \alpha r z$$

où D est une longueur constante que l'on ne cherchera pas à déterminer et où $B(O)$ désigne la norme du champ magnétique en O . Déterminer à partir d'une équation de Maxwell la valeur de la constante α en fonction de D

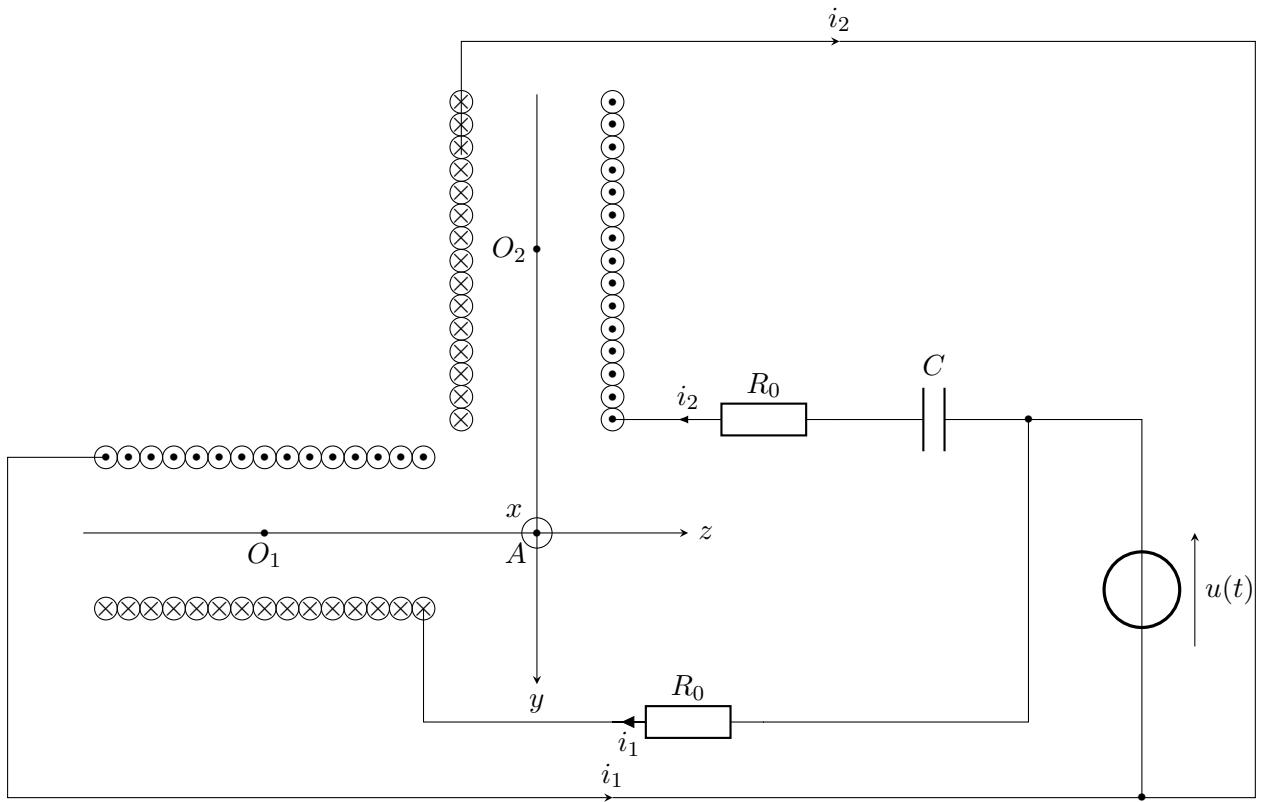


Figure 3

Partie II. – Étude d'un champ magnétique tournant

On ajoute une seconde bobine identique à celle étudiée précédemment, placée perpendiculairement à la première, de façon à obtenir la configuration représentée sur la figure 3. Le point A est placé à $d = 10$ cm du centre de chaque bobine.

On alimente l'ensemble par une source idéale de tension de force électromotrice sinusoïdale $u(t) = U \cos(\omega_0 t)$. Chaque bobine possède une inductance L_b et une résistance R_b . La bobine verticale est parcourue par un courant d'intensité $i_2(t)$ et la bobine horizontale par un courant d'intensité $i_1(t)$. On se place dans l'A.R.Q.S., ce qui fait que les résultats de la partie I. restent valables, même si les intensités dépendent du temps.

4. Dessiner le schéma électrocinétique correspondant à ce montage. On y fera figurer les inductances, résistances et la capacité C .
5. Déterminer :
 - a) la valeur de R_0 pour que le courant $i_1(t)$ soit en retard de phase de $\pi/4$ sur la tension $u(t)$;
 - b) la valeur de C pour que le courant $i_2(t)$ soit en avance de phase de $\pi/4$ sur la tension $u(t)$.
 - c) Application numérique avec $L_b = 200$ mH, $R_b = 0,5$ Ω et $f_0 = \omega_0/2\pi = 100$ Hz. Calculer R_0 et C .
 - d) Montrer que les intensités parcourant les deux bobines ont la même amplitude lorsque les conditions précédentes sont remplies.

6. En déduire que le champ magnétique total $\vec{B}(A, t)$ créé au point A par l'ensemble des deux bobines s'écrit sous la forme :

$$\vec{B}(A, t) = B_0 \left[\cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{4}\right) \vec{e}_z + \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{4}\right) \vec{e}_y \right]$$

où B_0 est une constante donc l'expression n'est pas exigée.

7. Montrer que la norme de $\vec{B}(A, t)$ est constante. Expliciter l'angle que fait le vecteur $\vec{B}(A, t)$ avec \vec{e}_y et conclure sur la caractéristique du champ magnétique ainsi produit en A .

Partie III. – Principe du moteur synchrone

Une boussole est formée d'un aimant permanent, solide en forme d'aiguille équivalente à un petit dipôle magnétique \vec{m} de norme constante m , la direction du vecteur \vec{m} étant indiquée sur la Figure 4. Sur cette figure, le vecteur \vec{m} a été volontairement placé à côté de la boussole pour plus de lisibilité. En réalité on le placera au centre de la boussole.

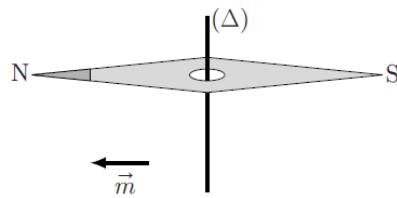


Figure 4

Cette aiguille aimantée peut librement tourner autour d'un axe (Δ) formant une liaison pivot à faible frottement.

Les interactions d'un dipôle magnétique rigide de moment dipolaire \vec{m} soumis à un champ magnétique extérieur \vec{B} sont décrites par l'énergie potentielle $E_p = -\vec{m} \cdot \vec{B}$ et par le couple des actions électromagnétiques $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B}$.

On place cette boussole au point A du montage décrit sur la Figure 3, l'axe (Δ) coïncidant avec l'axe (Ax). Le montage de la figure 3 est réglé de telle sorte que l'expression du champ magnétique en A est celui donné à la question 6.

On donne alors à l'aiguille un mouvement de rotation autour de (Δ) avec une vitesse angulaire ω , de sorte que l'angle $\beta(t) = (\widehat{\vec{e}_y}, \vec{m})$ s'écrit $\beta(t) = \omega t + \frac{\pi}{4} - \alpha$ à l'instant t , avec $\alpha \in]-\pi, \pi]$.

8. a) Calculer la valeur du couple $\vec{\Gamma}(t)$ exercé par le champ magnétique sur la boussole.
 b) À quelle condition sur ω sa valeur moyenne au cours du temps $\langle \vec{\Gamma} \rangle$ est-elle non nulle ? Lorsque cette condition est réalisée, donner l'expression de $\langle \vec{\Gamma} \rangle$ en fonction de α , B_0 et m .

On suppose que la condition sur ω est réalisée dans la suite du problème. Comme le champ magnétique tourne à une fréquence élevée, on admettra que seule la valeur moyenne $\langle \vec{\Gamma} \rangle$ du couple intervient pour étudier la rotation de la boussole.

- c) En déduire pour quelles valeurs de α ce dispositif fonctionne en moteur, c'est à dire lorsque l'action du champ magnétique est d'entraîner une rotation de l'aiguille dans le même sens.
9. En pratique, la constance de la vitesse angulaire ω de l'aiguille est assurée par les frottements sur son axe de rotation (Ax). Ces frottements solides créent un couple résistant $\vec{\Gamma}_r$ constant, dont on supposera la norme égale à $\Gamma_r = \frac{mB_0}{2}$, qui contrebalance le couple des actions électromagnétiques.

- a) Représenter $\langle \vec{\Gamma} \rangle \cdot \vec{e}_x$ en fonction de α , pour α variant dans la zone où le dispositif fonctionne en moteur.

Faire figurer les deux points de fonctionnement possibles sur ce schéma, qui assurent que la vitesse angulaire ω de la boussole reste constante. en régime permanent. Préciser les valeurs α_1 et α_2 correspondantes.

- b) Un expérimentateur curieux freine la rotation de l'aiguille à l'aide d'un stylo pendant une fraction de seconde, puis laisse le système évoluer à nouveau sous l'effet du couple électromagnétique moyen et des frottements. Montrer que seule une des deux valeurs de α précédentes de reprendre sa rotation à la vitesse angulaire ω_0 à la suite de cette perturbation. *On dit que le fonctionnement moteur est stable dans ce cas.*

FIN DU DEVOIR