Durée : 6 heures
Toutes séries réunies

SESSION 2005 **CLASSES TERMINALES**

SCIENCES PHYSIQUES

THEME : ELECTROMAGNETISME

Le sujet traite de quelques applications des forces électromagnétiques après une étude portant sur les sources de champs magnétiques.
De façon générale les questions posées font suite à un texte qui retrace quelques éléments d'histoire de l'électromagnétisme ou de ses applications et qui donne du sens à ces questions.
Le candidat devra d'abord lire attentivement ces textes.

PREMIERE PARTIE : SOURCES DE CHAMPS MAGNETIQUES.

A. LES AIMANTS ET LA TERRE (10 points)

Bien des siècles avant notre ère, les Hommes ont remarqué que certains minerais de fer avaient la propriété d'attirer des morceaux de fer. Ce sont des aimants.
La Terre elle même se comporte comme un énorme aimant. Le champ magnétique qu'elle produit, appelé aussi champ géomagnétique, joue un rôle capital pour la survie des espèces vivantes. Il agit comme un bouclier, la magnétosphère, qui fait dévier les particules chargées du vent solaire. Sans la magnétosphère, les rayonnements émis par les particules empêcheraient toute vie sur la Terre.
Jusqu'à environ quatre rayons terrestres du centre de la Terre, le champ géomagnétique est assimilable à celui que créerait un barreau aimanté placé à l'intérieur du globe; l'axe du barreau coïncide avec un diamètre de la Terre et se trouve incliné d'environ 11° sur l'axe de rotation de celle-ci ; les pôles magnétiques ne coïncident donc pas avec les pôles géographiques.
Les caractéristiques du champ magnétique terrestre varient d'un point à un autre de la Terre. Il existe des cartes d'égales déclinaisons magnétiques qui permettent de déterminer la direction du nord géographique, donc de s'orienter avec une boussole. Il existe aussi des cartes d'égales inclinaisons.

A.1 Définir les mots soulignés dans le texte ci-dessus.

A.2 Quelle est la nature des forces que la magnétosphère exerce sur les particules chargées du vent solaire ?

A.3 A Paris on a relevé les valeurs suivantes : déclinaison : 5° ouest ; inclinaison : 64,5°.
Le vecteur champ magnétique terrestre $\vec{B}_T$ y pointe vers le sol.

Schématiser la position prise par une aiguille aimantée en ce lieu en faisant apparaître l'inclinaison et la déclinaison. Représenter le vecteur $\overrightarrow{B_T}$ et déterminer sa valeur B_T au moment des relevés.

La composante horizontale du champ magnétique terrestre vaut $B_0 = 0,2.10^{-4}$ T.

A.4 D'après le texte, le champ magnétique terrestre peut être assimilé à celui d'un barreau aimanté placé à l'intérieur du globe. Schématiser alors la Terre avec les pôles géographiques et faire figurer le barreau aimanté en indiquant clairement son pôle sud et son pôle nord.

B. A LA DECOUVERTE DU CHAMP MAGNETIQUE DES COURANTS (50 points).

Dès le XVIII^ème^ siècle, de nombreux chercheurs s'efforcent d'établir un lien entre le magnétisme et l'électricité. Plus tard, le Danois OERSTED (1778 – 1851) observe en 1820, qu'une aiguille aimantée dévie lors du passage du courant dans un fil situé à proximité. En 1821, Ampère, de même que Biot et Savart, interprétèrent ce phénomène par l'existence d'un champ magnétique au voisinage du fil.
Etudiant le champ d'un courant dans un conducteur rectiligne, Ampère formula une nouvelle hypothèse : si on courbait le conducteur pour former un anneau ou spire circulaire, le champ serait concentré. Son hypothèse est confirmée par le spectre magnétique d'un conducteur ayant la forme d'un anneau.
Ampère enroula alors un fil en une longue hélice ou solénoïde. Il trouva qu'une telle bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant.

B.1 Courant rectiligne et courant circulaire.

B.1.1) Pour explorer le champ magnétique d'un courant rectiligne (expérience d'Oersted), on dispose d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical et pouvant osciller horizontalement. A l'absence de courant, un fil conducteur AA' horizontal très long est tendu parallèlement à l'aiguille aimantée et situé à une distance d = 5,0 cm de celle-ci (figure 1). On lance dans le fil un courant d'intensité I = 6,0 A, on constate que l'aiguille dévie d'un certain angle α.

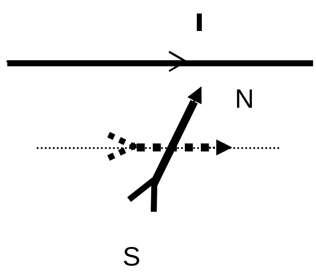


Figure 1

a) Faire un schéma représentant le vecteur champ magnétique $\vec{B}$ créé par le courant, la composante horizontale $\overrightarrow{B_0}$ du champ magnétique terrestre et l'angle de déviation α

b) Calculer la valeur de B .

c) Sachant que l'angle α de déviation de l'aiguille vaut 50,0° quelle valeur de la composante horizontale B_0 du champ terrestre déduit – on de cette expérience ?

On donne : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ SI (perméabilité du vide).

B.1.2) On cherche à confirmer par le calcul l'hypothèse d'Ampère : « *si le conducteur rectiligne est courbée pour former une spire le champ magnétique serait concentré* ».

Le problème consiste à calculer la valeur du champ magnétique créé au centre d'une spire parcourue par un courant électrique.

On considère donc une spire circulaire de rayon R parcourue par un courant d'intensité I. (X'X) est l'axe perpendiculaire au plan de la spire passant par son centre O. (figure 2)

On considère que l'élément $\vec{dl}$ du circuit crée au point M d'abscisse x sur l'axe (X'X) un champ $\vec{dB}$ dont la direction et le sens sont représentés sur la figure ; aussi $dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi}.\frac{d\ell}{r^2}$ où μ_0 est la perméabilité du vide et r la distance de l'élément $\vec{dl}$ au point M.

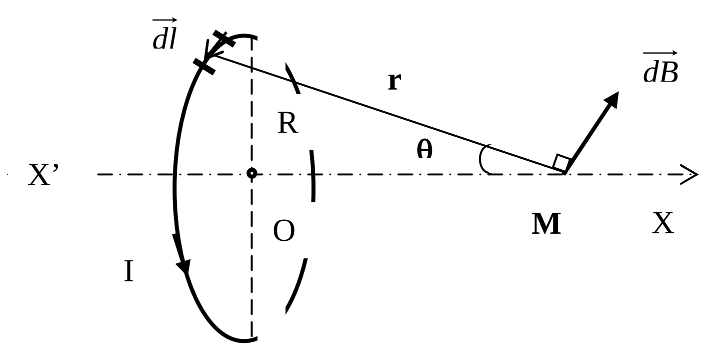


Figure 2

a) Montrer que la direction du champ créée par la spire circulaire est (X'X).

b) Montrer que l'intensité du champ créée par la spire circulaire au point M est $B(M) = \int dB \sin\theta$

c) En déduire que $B(M) = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{\left(R^2 + x^2\right)^{3/2}}$

d) Préciser les caractéristiques du vecteur champ magnétique $\vec{B}(O)$ crée par la spire parcourue par le courant I en son centre O. Schématiser la spire, le sens du courant et le vecteur $\vec{B}(O)$.

e) Calculer la valeur de B(O) pour I = 6A et R = 5 cm. Comparer la valeur ainsi obtenue avec celle calculée pour un courant rectiligne à la question B.1.1.b). Conclure.

B.2 Solénoïdes.

On cherche à caractériser le champ magnétique créé au centre d'un solénoïde de longueur finie L et de rayon R constitué d'un enroulement cylindrique de spires jointives de fil fin.

Le solénoïde est parcouru par un courant continu d'intensité I. Son axe est parallèle au vecteur unitaire $\vec{k}$ orienté comme indiqué sur la figure 3. L'origine des coordonnées est prise au point O de l'axe situé au centre du solénoïde.

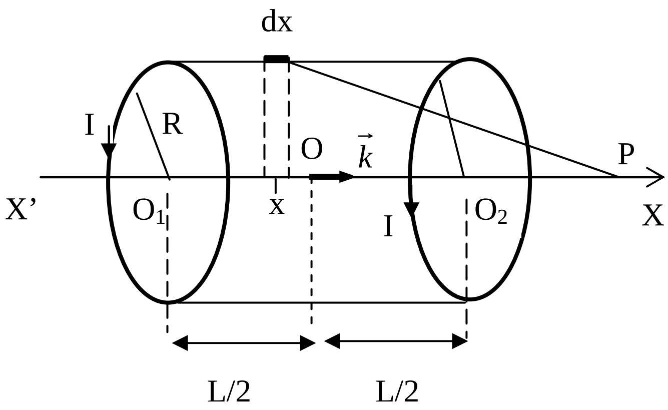


Figure 3

Le solénoïde peut être considéré comme la réunion de N spires jointives parcourues par le même courant I, délimité par les spires de centres O_1 d'abscisse – L/2 et O_2 d'abscisse L/2.

B.2.1) Montrer que le vecteur champ magnétique créé en un point quelconque de l'axe du solénoïde est colinéaire à l'axe, donc à $\vec{k}$.

B.2.2) On désigne par n le nombre de spires par unité de longueur (N = n L). Cela étant, le nombre de spires comprises entre les abscisses x et x + dx de l'axe est ndx.

Etablir l'expression de la valeur du champ magnétique dB créé par les ndx spires en un point P de l'axe d'abscisse x_p ($\overrightarrow{OP} = x_p\,\vec{k}$).

B.2.3)

a) Montrer alors que la valeur du champ magnétique créé par le solénoïde au point P est :

$$B(P) = \frac{\mu_0 nI}{2} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \frac{R^2}{\left[R^2 + (x_p - x)^2\right]^{3/2}} dx$$

b) Etablir alors, qu'en définitive, B(P) est donnée par l'expression :

$$B(P) = \frac{\mu_0 nI}{2}\left[\frac{x_p + \frac{L}{2}}{\sqrt{\left(x_p + \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} - \frac{x_p - \frac{L}{2}}{\sqrt{\left(x_p - \frac{L}{2}\right)^2 + R^2}}\right]$$

On pourra procéder aux changements de variable : $x_p - x = R \tan \theta$ et donc $dx = -\frac{Rd\theta}{\cos^2 \theta}$

<u>B.2.4)</u> Donner l'expression de la valeur B(O) du champ magnétique du solénoïde en son centre O.

<u>B.2.5)</u> Etudier les cas limites suivants :

a) champ d'un solénoïde très court (bobine plate).

b)) champ d'un solénoïde infiniment long.

On précisera à chaque fois l'expression de B(O).

<u>B.2.6)</u> On considère un solénoïde constitué d'un cylindre isolant de diamètre D = 4 cm autour duquel est enroulé un fil conducteur recouvert d'isolant de façon à constituer des spires jointives sur une couche. Le diamètre du fil, isolant compris, est d = 0,50mm. La longueur de la bobine est L = 50 cm. Le solénoïde est parcouru par un courant électrique d'intensité I.

a) Schématiser le solénoïde, le sens du courant et le vecteur champ magnétique B(O) en son centre.

b) Calculer l'intensité du champ magnétique B(O) créé au centre de la bobine si l'intensité du courant électrique qui la traverse vaut I = 500 mA.

La perméabilité du vide vaut : $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ SI.

<u>B.3</u> <u>Bobines de Helmholtz.</u>

Soit b_1, une bobine plate circulaire parcourue par un courant d'intensité I (figure 4 a). Elle a pour rayon moyen R=10 cm . La mesure du champ magnétique B_1 qu'elle crée, a donné les résultats suivants pour des points situés sur son axe, à la distance x du centre O_1 .

x (cm)	0	1	2	3	4	5	7,5	10	15	20
B_1 (10^{-5} T)	12,6	12,4	11,8	11,0	10,0	8,98	6,43	4,42	2,15	1,12

CLASSES TERMINALES

B.3.1) Représenter graphiquement, en fonction de x , les variations du champ magnétique B_1 créé par la bobine b_1 , x variant de 0 à 20 cm sur la partie O_1 x de l'axe de la bobine. (Par symétrie on obtiendrait les points correspondants à la partie O_1 x' ; ne pas faire cette construction). Echelle : en abscisses : 1 cm pour 1 cm ; en ordonnées : 1 cm pour 10^{-5} T

B.3.2) On place parallèlement à la première bobine, une deuxième bobine identique traversée par le même courant et dans le même sens. Son centre est situé en O_2 tel que O_1O_2 = d
(figure 4 b)

a) Préciser la direction et le sens du champ magnétique $\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2}$ qui existe entre les bobines b_1 et b_2. Recopier la figure 4b et représenter le vecteur $\vec{B}$.

b) En déduire par addition graphique la courbe donnant en fonction de x la valeur du champ magnétique B sur l'axe des deux bobines dans les cas suivants :

α) d = 5 cm β) d= 10 cm γ) d = 15 cm

c) Dans quel cas obtient – on un champ sur l'axe quasiment constant au voisinage du milieu O_1O_2 ? Quel intérêt présente ce dispositif ?

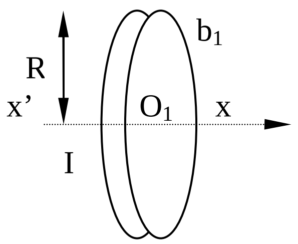


Figure 4a

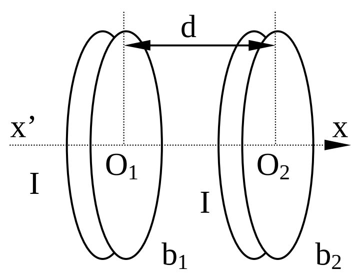


Figure 4b

DEUXIMEME PARTIE : ETUDE DE QUELQUES APPLICATIONS DES FORCES ELECTROMAGNETIQUES.

Un champ magnétique peut dévier des particules chargées en mouvement. De même, un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique, est soumis à une force électromagnétique.
Dans le tube d'un téléviseur, un faisceau d'électrons forme sur l'écran un spot qui se déplace rapidement en parcourant un grand nombre de lignes. La déviation du spot est assurée par l'action d'un champ magnétique.
Le physicien a conçu des accélérateurs de particules dont le but est de casser des noyaux et des nucléons en provoquant des collisions entre ces particules permettant ainsi de découvrir les constituants de la matière et de comprendre les interactions qui les régissent. Bon nombre d'accélérateurs de particules utilisent les actions conjuguées d'un champ électrique et d'un champ magnétique.
Dans un moteur électrique, des conducteurs logés dans les encoches du rotor et parcourus par un courant électrique sont soumis à des forces dues au champ magnétique créé par le stator; ce qui fait tourner le rotor.

C. ETUDE DES BOBINES DE DEFLEXION D'UN TELEVISEUR. (15 points).

Dans un téléviseur à écran cathodique, l'image est formée par l'impact d'un faisceau d'électrons sur la face arrière de l'écran (spot) (figure 5).

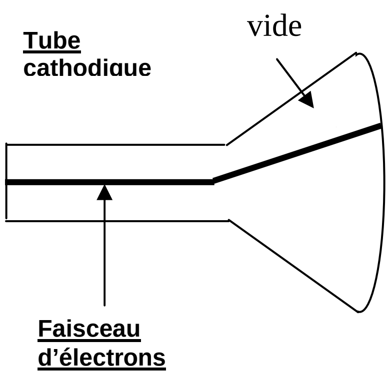
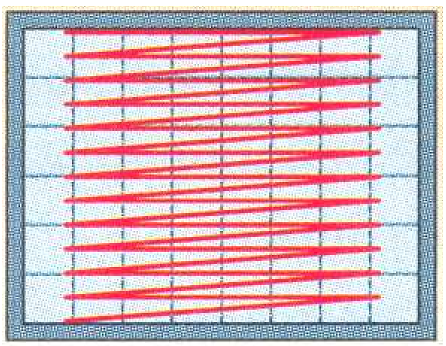


Figure 5a



Balayage de l'écran par le spot

Figure 5b

Pour former la totalité de l'image le spot balaye un ensemble de lignes horizontales en descendant progressivement le long de l'écran, puis revient à son point de départ en haut de celui-ci (figure 5b).
On s'intéresse ici au dispositif qui permet au faisceau de parcourir l'écran de haut en bas (« balayage trame») puis de revenir rapidement en haut de l'écran.

Pour un téléviseur « 50 Hz », la durée du balayage vertical est de 19 ms environ, et la durée du retour 1 ms environ. Ce dispositif est constitué de bobines créant un champ magnétique horizontal exerçant sur le faisceau une force électromagnétique de même nature que la force de Laplace.

Pour parvenir au but recherché, le champ magnétique doit croître régulièrement pendant 19 ms, puis décroître rapidement pendant 1 ms. Le courant dans une bobine doit donc être en « dents de scie » (figure 6).

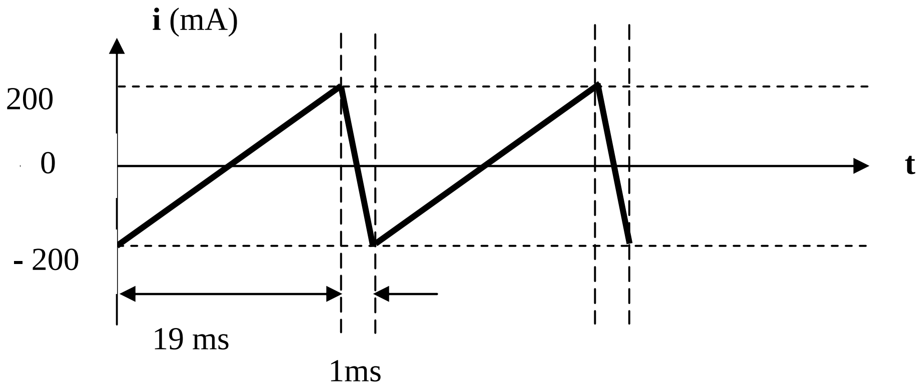


Figure 6

C.1) Quelle analogie peut-on envisager entre un faisceau d'électrons et le courant électrique qui circule dans un fil conducteur rectiligne?

Qu'appelle-t-on « force de Laplace » ? De quelles caractéristiques du champ magnétique la valeur et le sens de la force dépendent-ils?

C.2) Comment le champ magnétique créé par une bobine parcourue par le courant en « dents de scie» évolue-t-il au cours du temps? Quel est l'effet produit sur le faisceau d'électrons?

C.3) Combien d'aller-retours verticaux le faisceau effectue- t -il en une seconde?

Que signifie l'expression: « un téléviseur 50 Hz » ?

C.4 L'inductance de la bobine utilisée est L = 30 mH et sa résistance r = 15 Ω

a) Donner l'expression de la tension u aux bornes de la bobine en fonction de l'intensité i, de r et de L, en convention récepteur.

b) Exprimer l'intensité du courant en fonction du temps au cours de chacune des deux phases de la « dent de scie ».

c) En déduire l'expression de la tension u en fonction du temps pour chaque phase.

d) Tracer le graphe des variations de u en fonction du temps.

D. ETUDE D'UN CYCLOTRON (15 points).

Un cyclotron à fréquence fixe est un accélérateur de particules constitué de deux demi-cylindres creux appelés dees , Δ_1 et Δ_2, séparés par un faible intervalle (figure 7).

Un champ magnétique uniforme $\vec{B}$ est créé dans les dees ; sa direction est perpendiculaire au plan de la figure.

Un champ électrostatique est établi entre les deux dees pour accélérer les particules à chaque fois qu'elles passent dans l'intervalle.

A la date t = 0, on envoie une bouffée de protons depuis le centre. Ils sont accélérés puis pénètrent dans le dee Δ_1 où ils sont déviés.

D.1) Préciser la nature du mouvement des protons à l'intérieur de Δ_1.

D.2) Pour qu'ils soient à nouveau accélérés entre les deux dees lors du passage de Δ_1 vers Δ_2, quel doit être le sens du vecteur champ électrique quand les protons sortent de Δ_1 ?

D.3) On obtient ce résultat en imposant entre les deux dees une tension alternative sinusoïdale.

En déterminant la durée nécessaire pour que les protons effectuent un demi-tour, montrer que la fréquence de la tension accélératrice reste constante pendant toute la durée de fonctionnement (on négligera la durée de transfert entre les dees).

Quelle est la valeur de cette fréquence ?

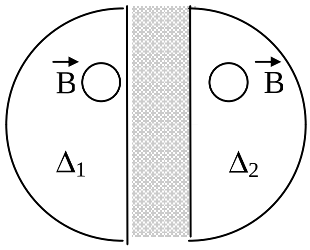


Figure 7

D.4) On a B = 0,2 T et R = 1 m. Quelle est la vitesse maximum des protons ?

D.5) La tension accélératrice est de 1000 V. Quel est le nombre de tours parcourus par les protons avant qu'ils atteignent la circonférence ?

D.6 Calculer la distance parcourue par les protons lors de leur accélération.

D.7 En fait, la distance entre les dees, d = 10 cm, n'est pas négligeable.

Montrer que la durée pour effectuer un demi-tour évolue. Quelles sont les valeurs extrêmes de la fréquence de la tension accélératrice pour qu'à chaque demi-tour l'accélération soit maximum ? Quelle est la loi de variation de cette fréquence ?

On donne :

Masse du proton : $m_p = 1,67.10^{-27}$ kg

Charge élémentaire : $e = 1,6.10^{-19}$ C.

E.ETUDE D'UN MODÈLE DE MOTEUR DE VOITURE. (10 points).

E.1) Une voiture électrique est équipée d'un moteur à courant continu alimenté par une batterie.

Lorsque la voiture est en fonctionnement, le moteur se comporte comme un récepteur électrique dont la caractéristique est la suivante :

$U_{AB} = E + r.I$, où $U_{AB} = 200$ V représente la tension d'alimentation et $r = 0,30\ \Omega$ la résistance interne du moteur.

La vitesse angulaire ω du rotor est proportionnelle à la force contre électromotrice E du moteur suivant la formule $E = K\omega$ avec $K = 1,31\ V.rad^{-1}.s$.

E.1.1) Le moteur est traversé par un courant d'intensité I = 150 A.

a. Quelle est la force contre - électromotrice du moteur ?

b. Quelle est la fréquence de rotation du rotor n en tr/min ?

c. Quelle sont les pertes par effet joule dans le moteur ?

E.1.2) Le document ci-contre (figure 8) représente le schéma simplifié d'un moteur à courant continu.

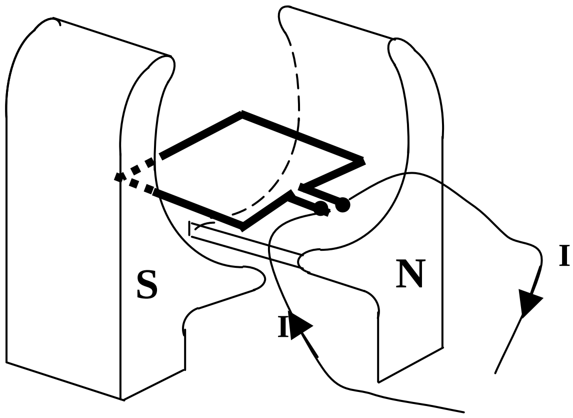


Figure 8

a. Reproduire le cadre du rotor et indiquer le sens du courant et celui du champ magnétique.

b. Indiquer les forces de Laplace qui provoquent la mise en mouvement du rotor.

E.2 La suite traite de l'étude électromagnétique d'un modèle simplifié de moteur.

E.2.1 Soit un conducteur filiforme rectiligne MN astreint à tourner autour de l'axe Oz à la vitesse angulaire $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$ (figure 9).

On pose $\overrightarrow{OM} = a\,\overrightarrow{u_r}$; $\overrightarrow{ON} = b\,\overrightarrow{u_r}$; $(OX , \overrightarrow{u_r}) = \theta$.

Dans tout l'espace balayé par MN règne un champ magnétique uniforme et indépendant du temps : $\vec{B} = -B_0\vec{k}\ (B_0 > 0)$, $\vec{k}$ étant le vecteur unitaire sur Oz.

Calculer, en fonction de B_0, a, b et ω, la différence de potentiel entre M et N.

E.2.2) Les extrémités M et N glissent sans frottement sur deux circonférences conductrices de résistance électrique négligeable, C_1 de rayon a, C_2 de rayon b. MN est parcouru par un courant d'intensité I, de M vers N. Calculer, en fonction de B_0, a, b et I, le moment par rapport à Oz des forces magnétiques exercées sur MN.

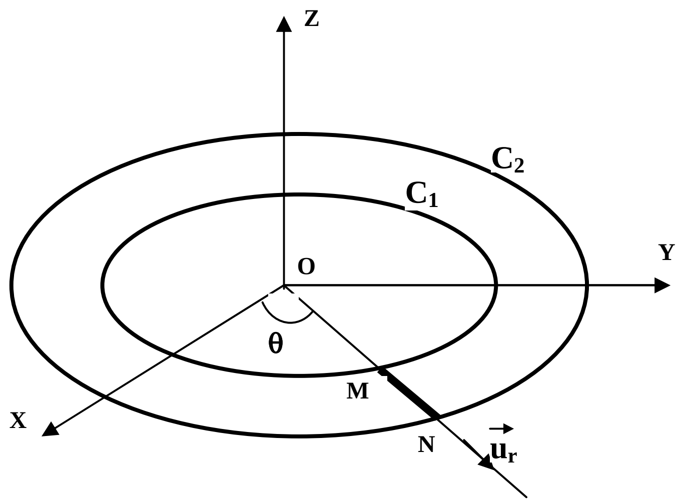


Figure 9

E.2.3) Au lieu d'un conducteur unique MN, on en utilise un nombre k ; ils sont touts identiques à MN et régulièrement répartis autour de Oz.

a) Le système tournant autour de Oz avec la vitesse $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$, quelle différence de potentiel apparaît entre C_1 et C_2 ?

b) Chaque conducteur étant parcouru de C_1 vers C_2 par un courant d'intensité $\dfrac{I}{k}$, calculer le moment des forces magnétiques par rapport à Oz.

E.2.4) Le dispositif décrit en E.2-3° constitue le rotor d'un moteur tournant à la vitesse angulaire constante ω. Calculer, en fonction de u, a, b, B_0, R et ω, le moment Γ_{Oz} par rapport à Oz des forces exercées sur la partie mobile lorsqu'on branche entre C_1 et C_2 un générateur continu de force électromotrice u et de résistance intérieure R, dont la borne positive est reliée a C_1. (La résistance électrique de chaque conducteur MN est supposée négligeable). Application numérique. Calculer Γ_{Oz} pour u = 4 V, R = 1Ω, B_0 = 1 T, a = 1 cm et b = 5 cm ; vitesse de rotation du rotor : 100 tours par seconde.