CC3

Électromagnétisme

18 Janvier 2024 — PréIng2

Durée : 1h30 minutes (2h en cas de tiers temps)

Sont interdits :

— les documents ;

— tous les objets électroniques (calculatrice, téléphone, tablette, ordinateur...) de même que les montres connectées ;

— les déplacements et les échanges.

Consignes :

1. Vérifiez que le sujet est composé de 16 pages et 20 questions ;
2. Seules les dernières feuilles doivent être rendues ;
3. Complétez la page 9 (nom, prénom etc…) dès le début officiel de l'épreuve ;
4. Les détails des calculs demandés doivent être portés sur ces dernières feuilles à l'emplacement correspondant à la question ;
5. Dans les deux grilles, les cases correspondant à la bonne réponse doivent être remplies complètement au stylo noir ;
6. Chaque question ne comporte qu'une seule réponse possible ;
7. Il n'y a de point négatif pour une mauvaise réponse que pour les questions de cours ;
8. Une case simplement cochée ne sera pas comptabilisée.

Le barème est donné à titre indicatif.

Données

Rotationnel d'un champ vectoriel $\vec{U}$, dans la base de coordonnées cylindriques $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$:

$$\overrightarrow{\mathrm{rot}}\vec{U} = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial U_z}{\partial \theta} - \frac{\partial U_\theta}{\partial z}\right)\vec{u_r} + \left(\frac{\partial U_r}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial r}\right)\vec{u_\theta} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial (rU_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial U_r}{\partial \theta}\right)\vec{u_z}$$

Questions de cours (5 points)

Question 1 (0.5 point)
En étudiant les plans de *symétrie pour la distribution de courant*, on trouve que la direction du champ magnétique $\vec{B}$ en M est :

- [A] inclus dans tout plan Π de symétrie, passant par M.
- ■ celle de la droite orthogonale à un plan Π de symétrie, passant par M.
- [C] celle de la droite intersection d'au moins deux plans de symétrie, passant par M.
- [D] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 2 (0.5 point)
Le **théorème d'Ampère** relie le *champ magnétique* $\vec{B}$ et l'*intensité* des courants I_i (comptés algébriquement) qui traversent toute surface ouverte S, s'appuyant sur un contour Γ. Il s'énonce :

- [A] $\oiint_\Gamma \vec{B}\cdot\vec{dl} = \mu_0 \sum_i I_i$
- [B] $\oint_\Gamma \vec{B}\wedge\vec{dl} = \mu_0 \sum_i I_i$
- [C] $\oiint_\Gamma \vec{B}\cdot\vec{dS} = \mu_0 \sum_i I_i$
- ■ $\oint_\Gamma \vec{B}\cdot\vec{dl} = \mu_0 \sum_i I_i$
- [E] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 3 (1 point)
La **loi de Biot et Savart** permet de calculer le champ magnétique $\vec{B}$ en M, pour un fil parcouru par un courant I. Elle s'énonce :

- [A] $\vec{B}(M) = \oint_{P\in \text{fil}} \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\vec{dl}\wedge\overrightarrow{MP}}{MP^2}$
- ■ $\vec{B}(M) = \oint_{P\in \text{fil}} \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\vec{dl}\wedge\overrightarrow{PM}}{PM^3}$
- [C] $\vec{B}(M) = \oint_{P\in \text{fil}} \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{\vec{dl}\wedge\overrightarrow{PM}}{PM^2}$
- [D] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 4 (0.5 point)
En étudiant les plans d'*anti-symétrie pour la distribution de courant*, on trouve que le vecteur champ magnétique $\overrightarrow{B}$ en M

- A a pour direction celle de la droite orthogonale à un plan Π' d'anti-symétrie, passant par M.
- ■ est inclus dans tout plan Π' d'anti-symétrie, passant par M.
- C a pour direction celle de la droite intersection d'un plan de symétrie et d'un plan d'anti-symétrie, passant par M.
- D *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 5 (0.5 point)
Soit c la vitesse de la lumière dans le vide. Elle s'exprime en fonction des deux constantes ε_0 et μ_0 par :

- ■ $c^2 = \dfrac{1}{\varepsilon_0\mu_0}$
- B $c = \varepsilon_0\mu_0$
- C $c = \dfrac{1}{\varepsilon_0\mu_0}$
- D $c^2 = \varepsilon_0\mu_0$
- E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 6 (1 point)
Soient la densité de courant $\overrightarrow{j}$ et la densité volumique de charges ρ, l'équation locale de conservation de la charge électrique s'écrit alors :

- A $\operatorname{div} \overrightarrow{j} - \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$
- B $\operatorname{div} \overrightarrow{j} - \varepsilon_0\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$
- ■ $\operatorname{div} \overrightarrow{j} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$
- D $\operatorname{div} \overrightarrow{j} + \varepsilon_0\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$
- E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 7 (1 point)
Les quatre équations de Maxwell pour le champ éléctromagnétique sont :

- A $\operatorname{div} \overrightarrow{E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\operatorname{div} \overrightarrow{B} = 0$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{E} = \dfrac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{B} = \mu_0\overrightarrow{j} + \mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t}$
- B $\operatorname{div} \overrightarrow{E} = \rho$; $\operatorname{div} \overrightarrow{B} = 0$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{E} = \dfrac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{B} = \mu_0\overrightarrow{j} + \mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t}$
- ■ $\operatorname{div} \overrightarrow{E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$; $\operatorname{div} \overrightarrow{B} = 0$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{E} = -\dfrac{\partial \overrightarrow{B}}{\partial t}$; $\overrightarrow{\operatorname{rot}}\overrightarrow{B} = \mu_0\overrightarrow{j} + \mu_0\varepsilon_0\dfrac{\partial \overrightarrow{E}}{\partial t}$
- D *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Cylindre parcouru par un courant (7 points)

On considère un cylindre plein infiniment long, d'axe (Oz) et de rayon R. Il est parcouru par un courant I constant et uniforme suivant sa longueur. On repère un point M de l'espace dans la base de coordonnées cylindriques : $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$.

On cherche l'expression du champ magnétique $\vec{B}(M)$ créé en un point M.

Question 8 (0.5 point)
La densité de courant surfacique $\vec{j}$ s'écrit en fonction de I :

- A $\vec{j} = \dfrac{I}{\pi R^2}\vec{u}_r$
- B $\vec{j} = \dfrac{I}{\pi r^2}\vec{u}_z$
- ■ $\vec{j} = \dfrac{I}{\pi R^2}\vec{u}_z$
- D $\vec{j} = \dfrac{I}{\pi r^2}\vec{u}_z$
- E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 9 (0.5 point)
En regardant les invariances, on constate que $B(r, \theta, z)$ ne dépend que de :

A φ ■ r C z D θ E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 10 (1 point)
Du fait des plans de symétries, le vecteur champ magnétique $\vec{B}(M)$ s'écrit :

- A $\vec{B}(M) = B(z)\vec{u}_r$ et $\vec{B}(0) \neq \vec{0}$.
- B $\vec{B}(M) = B(r)\vec{u}_\theta$ et $\vec{B}(0) \neq \vec{0}$.
- C $\vec{B}(M) = B(z)\vec{u}_z$ et $\vec{B}(0) \neq \vec{0}$.
- D $\vec{B}(M) = B(\theta)\vec{u}_\theta$ et $\vec{B}(0) = \vec{0}$.
- ■ $\vec{B}(M) = B(r)\vec{u}_\theta$ et $\vec{B}(0) = \vec{0}$.
- F *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 11 (1 point)
En utilisant une des équations de Maxwell, on peut écrire le vecteur champ magnétique $\vec{B}(M)$ pour $r \leqslant R$:

- ■ $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r\vec{u}_\theta$
- B $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_\theta$
- C $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_z$
- D $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r\vec{u}_z$
- E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 12 (1 point)
En utilisant une des équations de Maxwell, on peut écrire le vecteur champ magnétique $\vec{B}(M)$ pour $r \geqslant R$:

■ $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_\theta$

B $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \vec{u}_z$

C $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \vec{u}_\theta$

D $\vec{B}(M) = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\vec{u}_z$

E *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 13 (3 points)
En utilisant le *théorème d'Ampère*, démontrer l'expression du champ magnétique $\vec{B}(M)$ pour $r \geqslant R$, en détaillant les calculs (symétries, invariances, contour d'*Ampère* ...).
Répondez sur la feuille correspondante, à la fin du sujet.

Solénoïde infini parcouru par un courant (4 points)

On considère un solénoïde de rayon a parcouru par un courant d'intensité courant I constant et uniforme, et dont la longueur peut être considérée comme infinie. Son axe Oz coïncide avec celui du repère cylindrique $\mathcal{R} = \{0\,;(\overrightarrow{u_r}, \overrightarrow{u_\theta}, \overrightarrow{u_z})\}$. Il comporte n spires par unité de longueur.

On connaît le potentiel vecteur $\overrightarrow{A}$ en un point quelconque de l'espace défini par sa distance r à l'axe Oz :
- si $r < a$, $\overrightarrow{A}(M) = \dfrac{\mu_0 n I}{2} r\ \overrightarrow{u_\theta}$
- si $r > a$, $\overrightarrow{A}(M) = \dfrac{\mu_0 n I}{2r} a^2\ \overrightarrow{u_\theta}$

On cherche l'expression du champ magnétostatique $\overrightarrow{B}(M)$ en tout point de l'espace.

Question 14 (1 point)
Alors, on peut écrire le vecteur champ magnétique $\overrightarrow{B}(M)$ pour $r < a$:

- [A] $\overrightarrow{B}(M) = \overrightarrow{0}$
- [B] $\overrightarrow{B}(M) = \dfrac{\mu_0 n I}{r}\vec{u_z}$
- [C] $\overrightarrow{B}(M) = \mu_0 n I r \vec{u_z}$
- ■ $\overrightarrow{B}(M) = \mu_0 n I \vec{u_z}$
- [E] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 15 (1 point)
Démontrer l'expression du champ magnétique $\overrightarrow{B}(M)$ pour $r < a$ en détaillant les calculs (potentiel vecteur $\overrightarrow{A}$ puis calcul de $\overrightarrow{B}(M)$ ...).
Répondez sur la feuille correspondante, à la fin du sujet.

Question 16 (1 point)
Alors, on peut écrire le vecteur champ magnétique $\overrightarrow{B}(M)$ pour $r > a$:

- ■ $\overrightarrow{B}(M) = \overrightarrow{0}$
- [B] $\overrightarrow{B}(M) = \mu_0 n I \vec{u_z}$
- [C] $\overrightarrow{B}(M) = \mu_0 n I r \vec{u_z}$
- [D] $\overrightarrow{B}(M) = \dfrac{\mu_0 n I}{r}\vec{u_z}$
- [E] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte*

Question 17 (1 point)
Démontrer l'expression du champ magnétique $\overrightarrow{B}(M)$ pour $r > a$ en détaillant les calculs (potentiel vecteur $\overrightarrow{A}$ puis calcul de $\overrightarrow{B}(M)$ ...).
Répondez sur la feuille correspondante, à la fin du sujet.

Spire (6 points)

Une spire de centre O et de rayon R est parcourue par un courant d'intensité I constante et uniforme (fig.1). On repère un point M de l'espace dans la base de coordonnées cylindriques : $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$.

On cherche l'expression du champ magnétique $\vec{B}(M)$ créé en un point M de l'axe de révolution de cette spire.

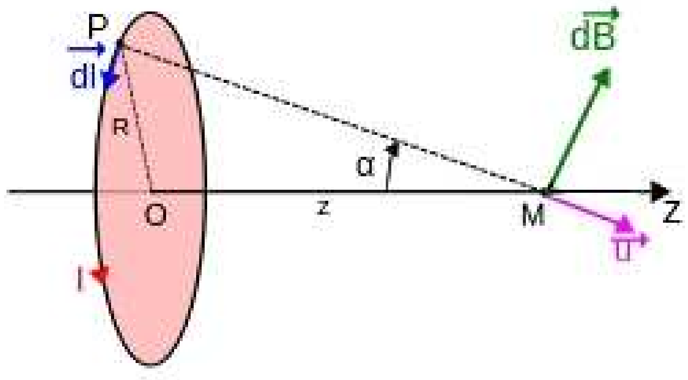


FIGURE 1 – Spire circulaire

Question 18 (1 point)
Du fait des invariances, le champ magnétique $\vec{B}(M)$ ne dépend que de :

[A] θ [B] φ [C] r ■ z [E] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 19 (1 point)
Du fait des symétries, le champ magnétique $\vec{B}(M)$

[A] est radial.

[B] est orthoradial.

[C] a une composante radiale et orthoradiale.

■ est selon (Oz).

[E] *Aucune des réponses précédentes n'est correcte.*

Question 20 (4 points)
Démontrer que le champ magnétique $\vec{B}(M)$ en un point M de l'axe de révolution de la spire s'écrit :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 I}{2R} \sin^3(\alpha) \vec{u}_z$$

Détailler les calculs : symétries, invariances ...
Répondez sur la feuille correspondante, à la fin du sujet.

Correction

Correction

Électromagnétisme - PréIng2 - CC3 - 2023/2024

NOM : ....

Prénom : ....

n^{o} Groupe : ....

Nom du chargé de TD : ....

CODAGE DU N^{O} ÉTUDIANT *HORIZONTALEMENT* (DANS LE SENS DE LECTURE)

Premier chiffre du n^{o} étudiant

Dernier chiffre du n^{o} étudiant

0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9

SENS DE REMPLISSAGE

DU N^{O} ÉTUDIANT

Correction

Les réponses au QCM ne doivent être apportées que sur cette feuille.
La copie ne sera corrigée que si :

- **elle comporte vos nom, prénom et groupe ;**
- **les cases sont complètement coloriées avec un stylo noir ;**
- **la feuille-réponse ne comporte pas de ratures.**

Question 1 : A ■ C D

Question 2 : A B C ■ E

Question 3 : A ■ C D

Question 4 : A ■ C D

Question 5 : ■ B C D E

Question 6 : A B ■ D E

Question 7 : A B ■ D

Question 8 : A B ■ D E

Question 9 : A ■ C D E

Question 10 : A B C D ■ F

Question 11 : ■ B C D E

Question 12 : ■ B C D E

Question 14 : A B C ■ E

Question 16 : ■ B C D E

Question 18 : A B C ■ E

Question 19 : A B C ■ E

3 points

Question 13 : **Cylindre parcouru par un courant** *Réservé à l'enseignant(e)*

① Invariances :

↳ fil infini : même distribution de courant si on fait une translation selon (Oz)

$\Longrightarrow B(r, \theta, \cancel{z})$ indépendant de z — 0,5 pt

↳ fil : distribution de courant invariante par rotation autour de (Oz)

$\Longrightarrow B(r, \cancel{\theta}, z)$ indépendant de θ

② Symétrie : • plan $\Pi^* = (M, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$ plan d'antisymétrie $\rightarrow B \in \Pi^*$

• plan $\Pi = (M, \vec{e}_r, \vec{e}_z)$ plan de symétrie $\longrightarrow \vec{B} \perp \Pi$ donc — 0,5 pt

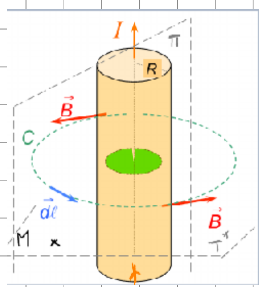
$\vec{B}$ suivant $\vec{e}_\theta$

$\Longrightarrow \boxed{\vec{B} = B(r)\, \vec{e}_\theta}$

ligne de champ = cercle de rayon r et d'axe (Oz)

↓

contour C



Théorème d'Ampère : $\oint_C \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I_{enlacés} = \mu_0 \left(\iint_S \vec{j} \cdot \vec{dS} \right)$

jS

↳ uniforme

à r constant

↳ $\oint_C \vec{B} \cdot \vec{dl} = \int_{\theta=0}^{2\pi} B(r)\, \vec{e}_\theta \cdot r\, d\theta\, \vec{e}_\theta = r B(r) \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi r\, B(r)$ — 1 pt

• $r > R$: $I_{enlacés} = I = j \pi R^2 \Longrightarrow \boxed{\vec{B} = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi r}\, \vec{e}_\theta}$ — 1 pt

1 point

Question 15 : **Champ magnétique à l'intérieur du solénoïde infini** *Réservé à l'enseignant(e)*

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{U} = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial U_z}{\partial \theta} - \frac{\partial U_\theta}{\partial z}\right)\vec{u_r} + \left(\frac{\partial U_r}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial r}\right)\vec{u_\theta} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial (rU_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial U_r}{\partial \theta}\right)\vec{u_z}$$

- pour $r < a$: $\vec{B} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A}$

$$\vec{A} = \left| \begin{array}{l} A_r = 0 \\ A_\theta = \dfrac{\mu_0 n I}{2}\, r \\ A_z = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\partial A_r}{\partial z} = \dfrac{\partial A_r}{\partial \theta} = 0 \\ \dfrac{\partial A_\theta}{\partial z} = 0 \\ \dfrac{\partial A_z}{\partial \theta} = \dfrac{\partial A_z}{\partial \rho} = 0 \end{array} \right.$$

0,25 pt

$$\frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} = A_\theta + r\frac{\partial A_\theta}{\partial r} = \frac{\mu_0 n I}{2} r + r\frac{\mu_0 n I}{2} = \mu_0 n I r$$

0,25 pt

donc $\underline{\vec{B}} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A} = \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial (r A_\theta)}{\partial r}\vec{u_z} = \underline{\mu_0 n I \vec{u_z}}$

0,5 pt

1 point

Question 17 : **Champ magnétique à l'extérieur du solénoïde infini** *Réservé à l'enseignant(e)*

- pour $r > a$: $\vec{B} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A}$

$$\vec{A} = \left| \begin{array}{l} A_r = 0 \\ A_\theta = \dfrac{\mu_0 n I}{2r} a^2 \\ A_z = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\partial A_r}{\partial z} = \dfrac{\partial A_r}{\partial \theta} = 0 \\ \dfrac{\partial A_\theta}{\partial z} = 0 \\ \dfrac{\partial A_z}{\partial \theta} = \dfrac{\partial A_z}{\partial \rho} = 0 \end{array} \right.$$

0,25 pt

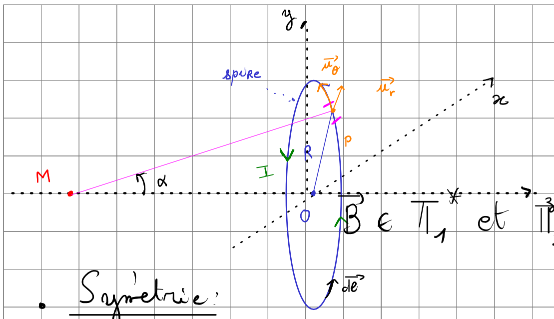
$$\frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} = \frac{\partial \left(\dfrac{\mu_0 n I}{2} a^2 \right)}{\partial r} = 0$$

0,25 pt

donc $\underline{\vec{B}} = \overrightarrow{rot}\,\vec{A} = \dfrac{1}{r} \dfrac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} \vec{u}_z = \underline{\vec{0}}$

0,5 pt

Question 20 : 2 points **Spire** [redacted] *Réservé à l'enseignant(e)*



$\vec{B} \in \Pi_1^*$ et Π_2^* $\longrightarrow$ $\vec{B}$ suivant $\vec{u}_z$

avec
- $\vec{d\ell} = R\, d\theta\, \vec{u}_\theta$
- $\vec{PM} = \vec{PO} + \vec{OM} = -\vec{OP} + \vec{OM}$
  $= -R\,\vec{u}_r + -z\,\vec{u}_z$
  z : côte du point M sur l'axe
- $\|\vec{PM}\|^2 = R^2 + z^2$

- Symétrie :
  $\Pi_1^* = (M, \vec{u}_r, \vec{u}_z)$ et $\Pi_2^* = (M, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$: plans d'antisymétrie $\Longrightarrow$ $\vec{B}$ suivant $\vec{u}_z$ 0,5 pt

- Invariance : invariance par rotation selon Oz : $\vec{B}$ ind. de θ
  M sur l'axe $\Longrightarrow r = 0$

$\hookrightarrow$ $\vec{B} = B(0,z)\,\vec{u}_z = B(z)\,\vec{u}_z$ 0,5 pt

$$\vec{B} = \int_{\text{spire}} \frac{\mu_0 I\, \vec{d\ell} \wedge \vec{PM}}{\|\vec{PM}\|^3}$$

$\vec{u}_\theta \wedge \vec{u}_z = \vec{u}_r$

$\vec{u}_\theta \wedge \vec{u}_r = -\vec{u}_z$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\text{spire}} \frac{R\, d\theta\, \vec{u}_\theta \wedge (-z\,\vec{u}_z - R\,\vec{u}_r)}{(R^2+z^2)^{3/2}}$$ 0,5pt

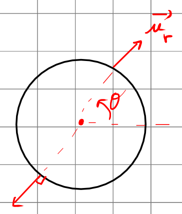
constant

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi (R^2+z^2)^{3/2}} \Big[-R \overbrace{\underbrace{\int_{\text{spire}} z\, d\theta\, \vec{u}_r}_{I_1}}^{=0} + R^2 \underbrace{\int_{\text{spire}} d\theta}_{I_2}\, \vec{u}_z \Big] = \frac{\mu_0 I}{2\cancel{4\pi}} \frac{\cancel{2\pi} R^2}{(R^2+z^2)^{3/2}}\, \vec{u}_z$$

$\vec{u}_z$ fixe

- $I_2 = \int_{\text{spire}} d\theta = \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta = 2\pi$

- $\vec{u}_r$ dépend de θ : $\vec{u}_r = \cos\theta\, \vec{u}_x + \sin\theta\, \vec{u}_y$ (fixes)



$$I_1 = \int_{\text{spire}} d\theta\, \vec{u}_r = \left(\int_{\text{spire}} d\theta \cos\theta\right) \vec{u}_x + \left(\int_{\text{spire}} d\theta \sin\theta\right) \vec{u}_y = \vec{u}_x \underbrace{[\sin\theta]_0^{2\pi}}_{=0} - \vec{u}_y \underbrace{[\cos\theta]_0^{2\pi}}_{1-1=0} = \vec{0}$$

$$\Longrightarrow \boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0 I\, R^2}{2(R^2+z^2)^{3/2}}\, \vec{u}_z}$$ 0,5pt

$\dfrac{\sin^3\alpha}{R}$

Feuille supplémentaire - (indiquer le numéro de la question rédigée)

Correction