

9-M- Champs magnétique

Intro : Carte Mentale

Introduction

Introduction :

Historiquement, un champ magnétique correspond à une région de l'espace où une aiguille aimantée subit une déviation.

On dit qu'un champ magnétique existe en un lieu de l'espace si une particule de charge q subit une force magnétique.

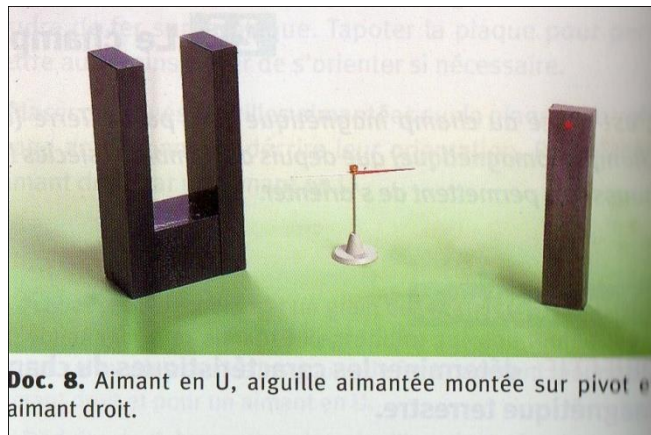
Comme de nombreuses étoiles et planètes, la Terre est une source de champ magnétique nommé champ magnétique terrestre (ou géomagnétique) ; on met en évidence le champ magnétique terrestre grâce à une boussole.

I / Mise en évidence du champ magnétique : caractéristiques.

1) Champ créé par un aimant

- Un aimant est un corps qui a la propriété d'attirer le fer.

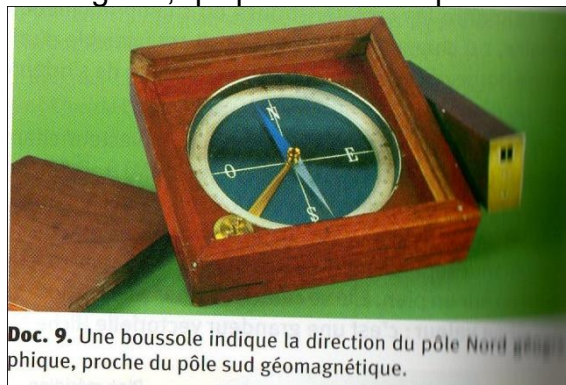
Certains corps solides sont des aimants naturels. De plus, quelques matériaux peuvent devenir des aimants après avoir été placés à proximité d'un autre aimant : des métaux (fer, cobalt, nickel...), des oxydes de ces métaux ainsi que certains alliages. On dit qu'ils ont été aimantés.



Doc. 8. Aimant en U, aiguille aimantée montée sur pivot et aimant droit.

- Une boussole est une petite aiguille aimantée libre de s'orienter dans un plan horizontal. Éloignée de tout objet avec lequel elle est susceptible d'interagir, elle s'oriente dans une direction fixe et pointe approximativement vers le Nord géographique de la terre.

On nomme pôle nord de l'aiguille l'extrémité qui pointe vers le Nord géographique. On nomme pôle sud l'extrémité opposée de l'aiguille, qui pointe vers le pôle Sud géographique.

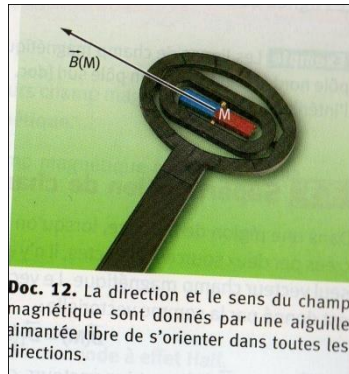


Doc. 9. Une boussole indique la direction du pôle Nord géographique, proche du pôle sud géomagnétique.

- Le vecteur champ magnétique en un point M est noté $\vec{B}(M)$:

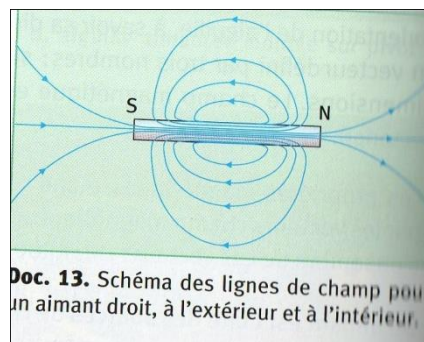
- Son origine est le point M
- Sa direction est celle d'une petite aiguille aimantée placée en M , libre de s'orienter dans toutes les directions
- Son sens va du pôle sud vers le pôle nord de l'aiguille

- La valeur du vecteur champ magnétique au point M est donnée par la norme $B(M)$ du vecteur $\vec{B}(M)$, affectée d'une unité : le tesla (T)

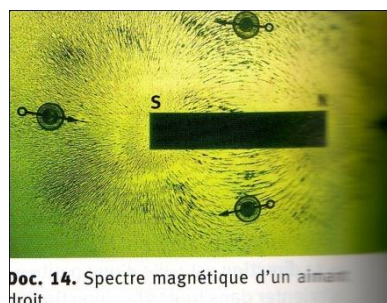


2) Observation des lignes de champ

Une ligne de champ est une courbe qui est tangente aux vecteurs champs magnétiques en chacun de ses points. Elle est orientée dans le sens des vecteurs champs magnétiques. A un point de l'espace correspond un seul vecteur champ magnétique, il est donc impossible que deux lignes de champ se coupent. De plus, les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes.

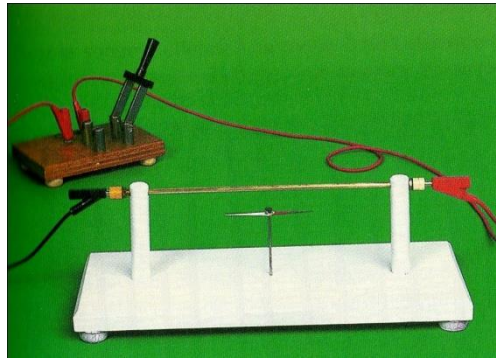
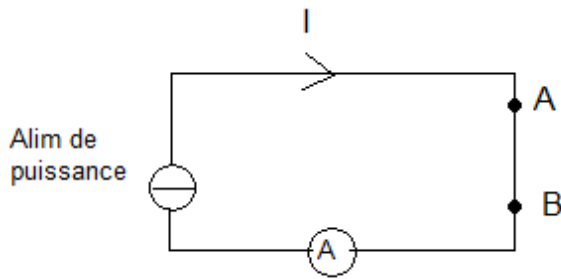


On peut « visualiser » les lignes de champ grâce à un spectre magnétique. Le spectre magnétique est formé de nombreux petits aimants orientés parallèlement à l'ensemble des lignes de champ magnétique d'une région de l'espace. Il permet de visualiser l'orientation des vecteurs champs magnétiques dans une zone de l'espace.



3) Détection du champ $\vec{B}$ créé par un courant

Expérience historique du physicien danois Oersted (1777-1851). Il a été l'un des premiers à remarquer le lien entre le courant électrique et le champ magnétique, défrichant un nouveau domaine de la physique : l'électromagnétisme. Il avait constaté qu'une aiguille aimantée était déviée au voisinage d'un conducteur parcouru par un courant. C'est ce qu'on nous allons remettre en évidence dans cette partie.

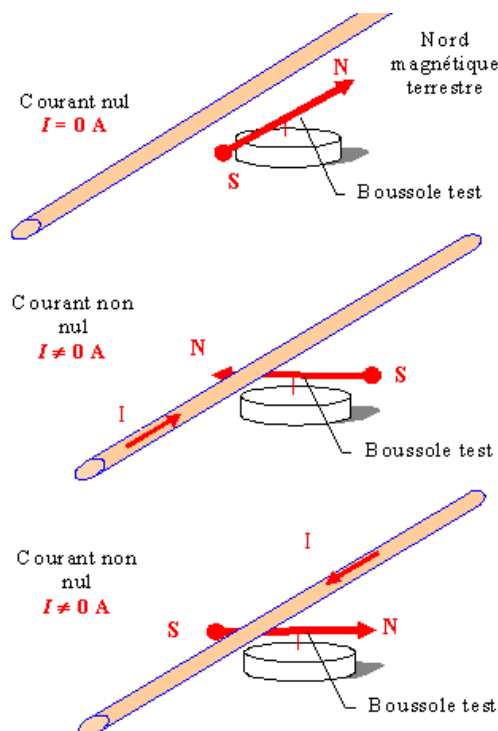


Rq : ampèremètre pour ne pas dépasser 10 A (pas utile avec alim de puissance)

On oriente le fil rectiligne entre A et B selon la direction Nord $\rightarrow$ Sud (selon le champ magnétique terrestre). Une boussole placée à proximité et à la verticale du fil (non parcouru par une intensité) est parallèle à celui-ci.

On allume l'alimentation de puissance, le fil est parcouru par un courant d'intensité I . On note une déviation de l'aiguille de la boussole d'autant plus grande que l'intensité est grande.

On inverse le sens de parcours du courant, la déviation de l'aiguille est elle aussi inversée.



En haut : En l'absence de courant dans le fil, il oriente celui-ci parallèlement à la boussole qui elle-même est orientée selon la direction Sud Nord de la Terre.

Au milieu : Lorsqu'il établit un courant dans la bobine, il remarque que celle-ci tourne de façon à se placer perpendiculairement au fil.

En bas : S'il inverse le sens du courant dans le fil, la boussole tourne dans l'autre sens !

→ Le courant est donc source d'un champ magnétique qui se superpose au champ magnétique terrestre.

De plus, on remarque que si on augmente l'intensité I , la déviation devient plus importante.

→ Le sens de la déviation dépend du sens de I .

II/ Etude du champ $\vec{B}$ créé par un solénoïde

A l'aide d'un teslamètre, on peut étudier la valeur du champ magnétique créé par un solénoïde long, en fonction de l'intensité du courant qui le parcourt (I), de son nombre de spires (N) et de sa longueur selon (L) :

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

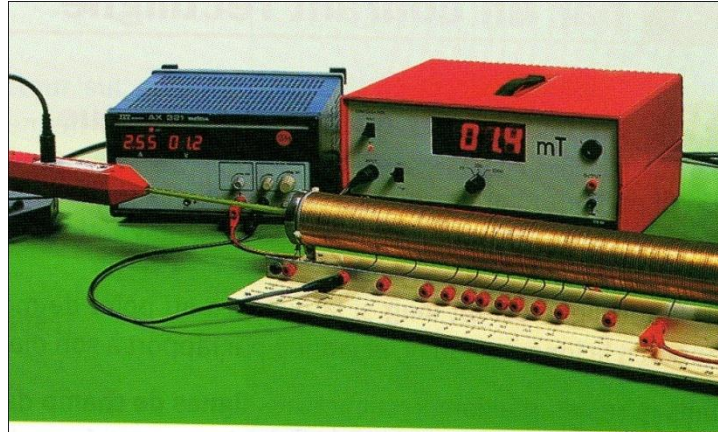
N=200 spires

L=40,0 ± 0,2 cm

X=0 au centre du solénoïde

ΔI=0,1 A (digit)

ΔB=0,02 mT



Doc. 5. Dispositif d'étude du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde (le générateur est muni d'un ampèremètre).

- En déplaçant la sonde dans le solénoïde, on se rend compte que le champ est plus important au milieu que sur les bords.

- Pour chaque intensité, on prend la mesure avec le courant dans un sens puis dans l'autre. La moyenne de ces deux mesures permet de s'affranchir des champs magnétiques considérés comme parasites ici tels que le champ magnétique terrestre ou celui d'un aimant pouvant être posé sur la table.

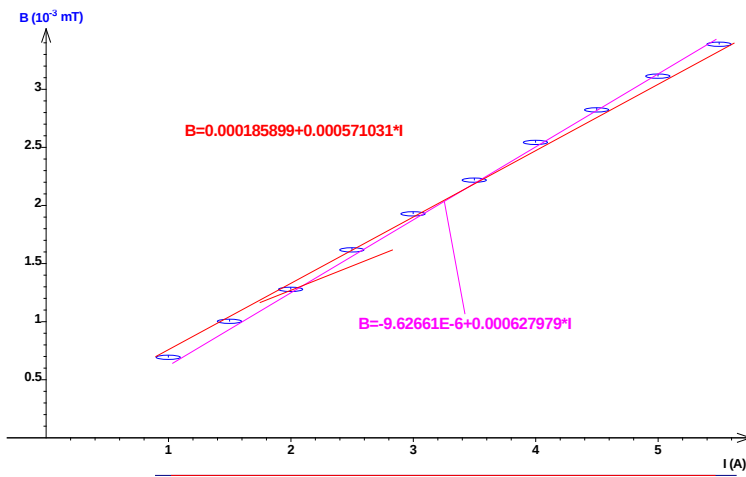
On mesure $B=f(I)$

$$B_{pos} = B_{parasite} + B$$

$$B_{neg} = B_{parasite} - B$$

donc
$$B = \frac{B_{pos} - B_{neg}}{2}$$

I	Bneg	Bpos	B
A	mT	mT	mT
1	-0.6	0.78	0.00069
1.5	-0.92	1.08	0.001
2	-1.19	1.36	0.001275
2.5	-1.53	1.7	0.001615
3	-1.85	2	0.001925
3.5	-2.15	2.28	0.002215
4	-2.49	2.59	0.00254
4.5	-2.78	2.86	0.00282
5	-3.09	3.13	0.00311
5.5	-3.4	3.37	0.003385



On obtient une droite passant par l'origine.

Pente max = 0,000627979 T.A⁻¹

Pente min = 0,000571031 T.A⁻¹

Pente moyenne = 0,000599505 ± 0,000056948 T.A⁻¹

$$\mu_{0,\text{exp}} = \frac{L}{N} \text{pente} = \frac{0,4}{200} * 0,000627979 = (1,3 \cdot 10^{-6} \pm 0,1 \cdot 10^{-6}) \text{SI}$$

$$\mu_{0,\text{th}} = 4\pi 10^{-7} = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{SI}$$

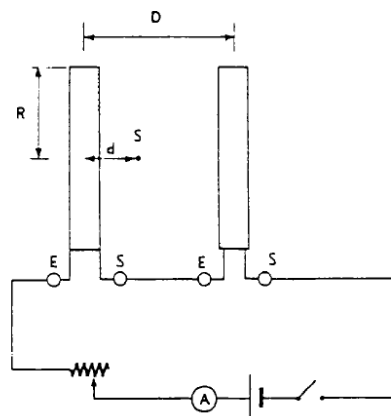
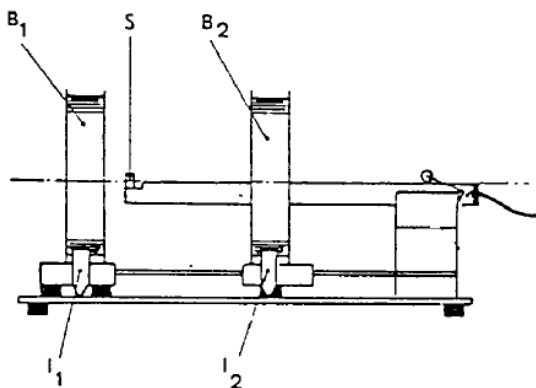
$$\text{Avec } \Delta\mu_0 = \mu_0 \left(\frac{\Delta \text{pente}}{\text{pente}} + \frac{\Delta L}{L} \right)$$

On retrouve bien une valeur de μ_0 , perméabilité du vide très proche de la valeur théorique aux incertitudes près.

II – Les bobines d’Helmholtz.

Objectifs :

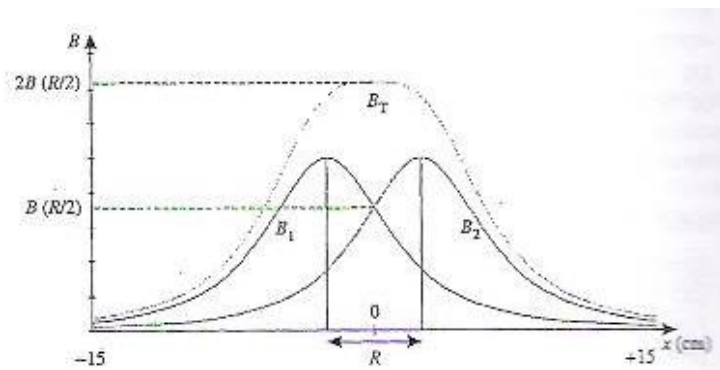
- ✓ création d’un champ magnétique constant.



L’idée est de créer un champ magnétique uniforme entre les 2 bobines, que l’on va mesurer à l’aide d’une sonde à effet Hall (Tesla mètre).

Pour ce faire il faut utiliser 2 bobines identiques distantes de D égale à leur rayon R et parcouru par un même courant ($I = 1\text{A}$). Prendre l’origine de la sonde au milieu des deux bobine et bien vérifier que l’on peut translater la sonde de part et d’autre jusqu’au centre des bobines respective.

Dans un premier temps on alimente seulement la 1^{ère} bobine puis dans un deuxième temps seulement la 2nd et enfin dans un dernier temps les 2 bobines. Dans chacun des cas on fait translater la sonde des part et d'autre et on relève $B = f(x)$ avec x la position de la sonde.



On voit bien sur la courbe qu'entre les 2 bobines on a un champ magnétique constant B_T .

Explication : en appliquant la loi de Biot et Savart à 1 spire puis qu'on l'applique à la bobine, on trouve que chaque bobine crée un champ magnétique $B =$

$$\frac{\mu_0 n I R b^2}{(Rb^2 + a^2)^{3/2}}$$

Entre les bobines, on a addition des deux champs magnétique. Lorsque la distance entre les deux bobines est égale à leur rayon ($Rb=a$) alors $B = \frac{2 \mu_0 n I}{Rb(2)^{3/2}}$ le champ résultant est à peu près uniforme.

III – Le canon à électron. (Dunod p 53)

Objectifs :

- ✓ Application des bobines d'Helmholtz.

❖ Expérience qualitative (peut être faite en introduction)

Montrer que la déviation du faisceau augmente (c'est-à-dire le rayon de courbure de la trajectoire diminue) lorsque l'intensité aux bornes des bobines augmente, donc lorsque le champ magnétique augmente, ou quand la vitesse des électrons diminue (U_a diminue)

Explication : La déviation du faisceau est due à la force de Lorentz auquel sont soumis les électrons par le biais du champ magnétique, cette force est $\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$ or dans ce cas $\vec{E} = \vec{0}$

❖ Expérience quantitative : mesure de $\frac{e}{m}$ (avec $e=q$ la charge et m la masse de l'électron)

Démonstration

On applique le PFD à l'électron de masse m dans le référentiel du laboratoire considéré comme galiléen. (En négligeant le poids)

$$\text{PFD : } m\vec{a} = e\vec{v} \wedge \vec{B} \quad \Leftrightarrow \quad m \begin{pmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ 0 \end{pmatrix} = e \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e V_y B \\ -e V_x B \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} (1) \quad m \dot{V}_x &= e V_y B \\ (2) \quad m \dot{V}_y &= -e V_x B \end{aligned}$$

Soit : $(1) + i(2) \Leftrightarrow m\dot{u} = e(V_y - i V_x)B$ on pose $u = V_x + i V_y$ et on a $V_y - i V_x = -iu$

$$\dot{u} = -iu \frac{eB}{m}$$

$$\dot{u} + i\omega u = 0 \quad \text{avec } \omega = \frac{eB}{m}$$

Pour résoudre l'équation on travaille en complexe $u = V e^{-i\omega t} = V(\cos \omega t - i \sin \omega t) = V_x + i V_y$
 $V_x = V \cos \omega t$

$$Vy = -V \sin \omega t$$

$\Leftrightarrow x = \frac{V}{\omega} \sin \omega t$ et $y = \frac{V}{\omega} \cos \omega t$ En prenant les coordonnées à l'origine = 0

L'équation d'un cercle nous donne $x^2 + y^2 = R^2$

$$\frac{V^2}{\omega^2} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = R^2 \text{ soit } \frac{V^2}{\omega^2} = R^2$$

Or la vitesse V d'un électron s'exprime : $V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ car $\frac{1}{2}mV^2 = eU$ avec U différence de potentiel

Démonstration : $\frac{1}{2}mV^2 = eU$

$$\begin{aligned} \text{Or } \Delta E_c &= \Sigma Wf & Wf &= \int -q \overrightarrow{\text{grad}V} \cdot \overrightarrow{dl} \\ \overrightarrow{F} &= q\overrightarrow{E} & &= -q(V_2 - V_1) \\ \overrightarrow{E} &= -\overrightarrow{\text{grad}V} & &= eU \end{aligned}$$

$$\text{Rappel : } \overrightarrow{\text{grad}V} \cdot \overrightarrow{dl} = \begin{pmatrix} \frac{\partial V}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}$$

$$R^2 = \frac{2eU}{\omega^2 m} = \frac{2eUm^2}{e^2 B^2 m} = \frac{m2U}{eB^2}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}$$

$$\text{Or } B = \frac{\mu_0 n I R b^2}{(Rb^2 + a^2)^{3/2}}$$

R : rayon du cercle que fait le faisceau d'électron
Rb : rayon des bobines
n : nombre de spire par bobine
a : distance entre les 2 bobines
U : tension à laquelle sont envoyés les électrons
(brancher un voltmètre sur le générateur)
I : intensité (Ampèremètre) envoyé aux bobines

$$\text{Incertitude : } \frac{\Delta \frac{e}{m}}{\frac{e}{m}} = \frac{\Delta U}{U} + 2 \frac{\Delta B}{B} + 2 \frac{\Delta R}{R} \cong 2 \frac{\Delta R}{R}$$

La plus grosse incertitude est sur les champs magnétique que l'on néglige mais en fait on ne sait pas si B est constant suivant y (la hauteur) selon x oui c'est la formule des bobines de Helmholtz.

D'après la théorie $\frac{e}{m} = 1.75 * 10^{11} \text{ C/kg}$

Remarque :

- Certains matériaux sont ferromagnétiques (fer, nickel, cobalt et leurs alliages), cela est due au mouvement des électrons autour des noyaux de ces éléments. Dans un matériau ferromagnétique il existe des domaines (de Weiss) d'aimantation privilégiés, la somme de toutes les aimantations microscopiques de ces domaines donne un champ magnétique résultant non nul lorsque celui est aimanté et nul lorsqu'il ne l'est pas.
- On magnétise un ferromagnétique en le faisant traverser un solénoïde qui a un fort champ magnétique (donc soumis à un fort courant) de se fait tout les domaines de Weiss s'alignent et ont le même domaine d'aimantation dont la résultante devient non nul.

Conclusion

Conclusion :

Question :

Annexe

I.4. PRINCIPE DU FLUXMÈTRE.

7

La force électromotrice (fem) induite aux bornes d'une bobine déplacée dans un champ magnétique non uniforme est proportionnelle au nombre de spires N de la bobine et à la dérivée par rapport au temps du flux Φ du champ magnétique à travers une spire. La valeur instantanée de la fem induite est donnée par l'expression $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$; e est en volts si le flux Φ est en Weber (T.m²).

La variation totale de flux est obtenue en intégrant cette expression par rapport au temps :

$$\int_0^t e(t') dt' = -N \int_0^t \frac{d\Phi}{dt'} dt' = -N \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = -N (\Phi_2 - \Phi_1)$$

Si $\Phi_2 = 0$, c'est-à-dire si la bobine est déplacée d'un champ magnétique B_1 de flux Φ_1 à travers sa surface S dans un champ magnétique nul, on a : $\int_0^t e(t') dt' = N\Phi_1$

L'intégration est faite en utilisant un circuit intégrateur constitué d'un circuit RC et d'un ampli opérationnel (figure ci-dessous). La tension de sortie de l'ampli vaut

$$V_S = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_e(t') dt' = \frac{1}{RC} \int_0^t N \frac{d\Phi}{dt'} dt' = \frac{N\Phi_1}{RC}.$$

Le champ magnétique est donné par $B_1(\text{Tesla}) = \Phi_1(\text{Weber})/NS(\text{m}^2)$.

