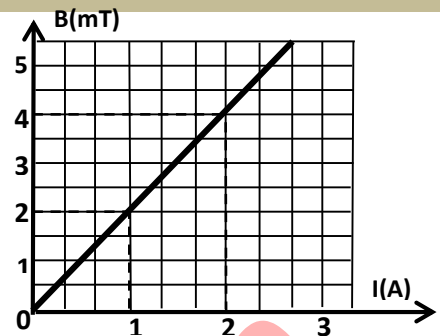


LEÇON 2: INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

SITUATION D'ENTREE

Au cours d'une séance de TP, un groupe d'élèves souhaite connaître le nombre N de spires constituant un solénoïde long de **50 cm**. L'enseignant met à leur disposition le graphe ci-contre tracé par leurs aînés d'il y a quelques années, représentant les variations de l'intensité du champ magnétique B en fonction de l'intensité du courant.

En exploitant ce graphe, aider les élèves à résoudre leur problème.



I- CHAMP MAGNETIQUE

1- Définition

Un **champ magnétique** est une région de l'espace dans laquelle des objets ferromagnétiques sont soumis à des forces magnétiques.

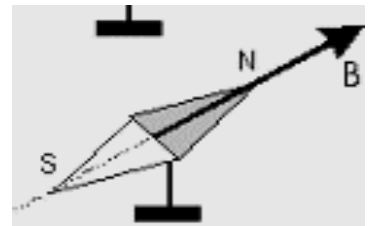
Un champ magnétique est caractérisé par une grandeur vectorielle appelée **vecteur champ magnétique** ou encore **induction magnétique** notée $\vec{B}$.

2- Caractéristiques du vecteur champ

Le champ magnétique en un point M est représenté par le vecteur dont les caractéristiques sont :

- ❖ **Point d'application** : Point M considéré
- ❖ **Direction** : c'est celle d'une aiguille aimantée placée en M
- ❖ **Sens** : C'est celui allant du pôle Sud vers le pôle Nord
- ❖ **Intensité** : Elle peut se mesurer à l'aide d'un **teslamètre** ou peut être déterminée par calcul.

NB : Dans le SI, l'unité du champ magnétique est le **Tesla (T)**.

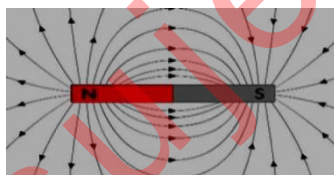


3- Spectre magnétique

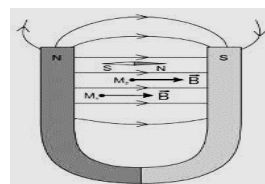
➤ **Ligne de champ** : c'est toute courbe tangente en chacun de ses points au vecteur champ magnétique $\vec{B}$. Elle entre par le pôle Sud et sort par le pôle Nord d'un aimant.

➤ **Spectre magnétique** : c'est l'ensemble des lignes de champ.

Remarque : Lorsque les lignes de champ sont des droites parallèles, le **champ magnétique est dit uniforme** : C'est l'exemple du champ magnétique à l'intérieur d'un aimant en U.



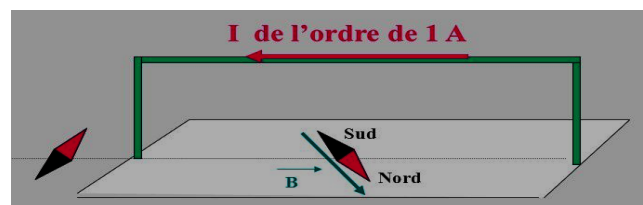
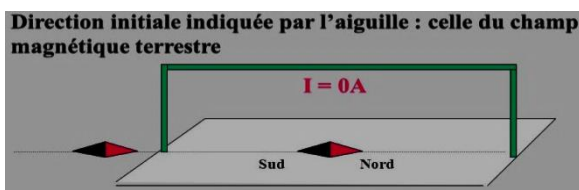
Spectre magnétique d'un aimant droit



Spectre magnétique d'un aimant en U

4- Champ créé par un courant

a) Mise en évidence



Lorsque le conducteur est parcouru par un courant électrique, on constate que l'aiguille aimantée dévie : elle est soumise à des forces magnétiques.

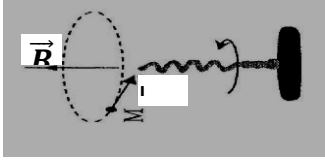
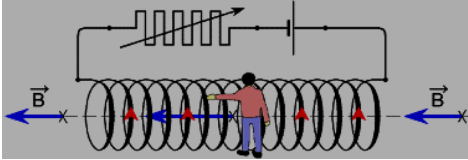
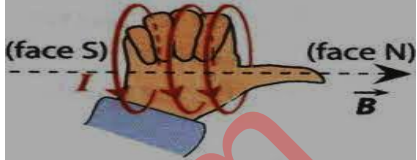
Un **conducteur parcouru par un courant crée dans son voisinage un champ magnétique**.

b) Caractéristiques du champ créé

Les caractéristiques des champs magnétiques créés par un courant traversant des conducteurs de différentes formes sont les suivantes :

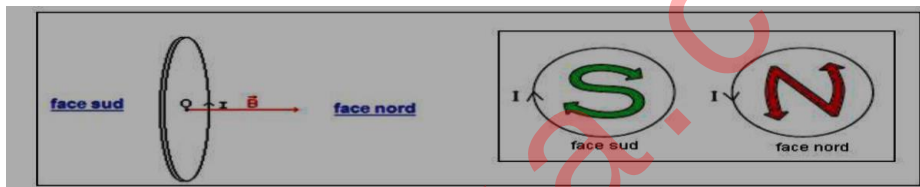
MODULE 4 : ASPECTS ENERGETIQUES DES CIRCUITS ELECTRIQUES

- ❖ **Direction** : En un point donné, la direction du champ magnétique est toujours tangente à la ligne de champ en ce point
- ❖ **Sens** : Plusieurs méthodes permettent de le déterminer :

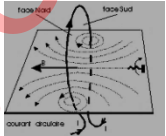
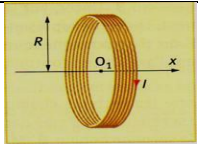
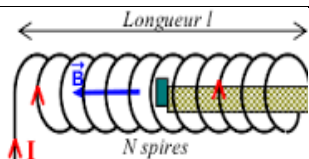
Règle du tire-bouchon	Règle du bonhomme d'Ampère	Règle de la main droite
Un tire-bouchon placé dans l'axe d'une bobine ou d'un solénoïde avance dans le sens de lorsqu'il tourne dans le sens des aiguilles du courant électrique.	L'observateur d'Ampère regardant le point où on veut déterminer le sens du champ est couché sur le conducteur de sorte que le courant le traverse des pieds vers la tête. Son bras gauche tendu indique le sens de $\vec{B}$	Lorsque la main droite est posée sur un conducteur de sorte que le courant parte de son poignet vers ses doigts, la paume de la main regardant le point où l'on veut déterminer le sens du champ magnétique, le pouce tendu indique le sens de $\vec{B}$
		

Remarque : Une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant ayant donc deux faces :

- La face Sud devant laquelle un observateur voit le courant circuler dans le sens des aiguilles d'une montre
- La face Nord devant laquelle un observateur voit le courant circuler dans le sens contraire des aiguilles d'une montre



- ❖ **Intensité** : Sa détermination dépend des caractéristiques du conducteur.

Type de conducteur	Spectre, direction et sens	Intensité du champ
Conducteur rectiligne	Les lignes de champ sont des cercles de centre O. La direction du champ est la tangente à la ligne de champ au point M. Le sens est donné par l'une des règles ci-dessus 	En un point M tel que $OM = d$, on a : $B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I}{d}$ avec $\begin{cases} I \text{ en A} \\ d \text{ en m} \\ B \text{ en T} \end{cases}$
Spire de rayon R		L'intensité du champ au centre de la spire est : $B = 2\pi \times 10^{-7} \times \frac{I}{R}$ avec $\begin{cases} I \text{ en A} \\ R \text{ en m} \\ B \text{ en T} \end{cases}$
Bobine plate ou conducteur circulaire de rayon R comportant N spires	 Une bobine est un enroulement de N spires qui s'étendent sur une longueur L négligeable devant le rayon R de la bobine	L'intensité du champ au centre de la bobine est : $B = 2\pi \times 10^{-7} \times \frac{NI}{R}$ ou $B = \frac{\mu_0}{2} \times \frac{NI}{R}$ avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$: Perméabilité magnétique du vide avec $\begin{cases} I \text{ en A} \\ R \text{ en m} \\ B \text{ en T} \end{cases}$
Solénoïde de longueur L comportant N spires	 Un solénoïde est une bobine longue dont le diamètre D est négligeable devant la longueur L	L'intensité du champ à l'intérieur du solénoïde est : $B = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{NI}{L}$ avec $\begin{cases} I \text{ en A} \\ L \text{ en m} \\ B \text{ en T} \end{cases}$ ou $B = \mu_0 \times \frac{NI}{L}$ avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$: Perméabilité magnétique du vide

Remarques

- ❖ En posant $n = \frac{N}{L}$ qui est le nombre de spires par unité de longueur, l'intensité du champ magnétique au centre du solénoïde s'écrit : $B = \mu_0 \cdot n \cdot I$
- ❖ Lorsque le fil utilisé a un diamètre d et d'épaisseur négligeable, la longueur de la bobine ou du solénoïde est: $L = N \cdot d$
- ❖ Lorsque le fil utilisé a un diamètre d et d'épaisseur e , la longueur de la bobine ou du solénoïde est:
 $L = N \cdot (d + 2e)$

Exemple d'application

Un solénoïde formé de **3000 spires** est parcouru par un courant d'intensité $I = 0,5A$. Il est fabriqué à partir d'un fil de diamètre $d = 0,8 mm$.

- 1- Calculer la longueur L du solénoïde

$$L = N \cdot d \quad \text{A.N.:} \quad L = 3000 \times 8 \times 10^{-4} = 2,4$$

$$L = 2,4 m$$

- 2- Calculer l'intensité du champ magnétique au centre du solénoïde

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{NI}{L} \quad \text{A.N.:} \quad B = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{3000 \times 0,5}{2,4} = 7,85 \times 10^{-4}$$

$$B = 7,85 \times 10^{-4} T$$

II- FLUX MAGNETIQUE A TRAVERS UNE SURFACE

1- Définition

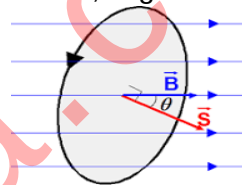
Les lignes de champ qui traversent la bobine sont plus importantes quand on rapproche l'aimant de la bobine. Pour apprécier le nombre de lignes de champ magnétique traversant une surface donnée, on définit une grandeur appelée **flux magnétique**.

On appelle **flux du champ magnétique** $\vec{B}$ à travers une surface d'aire S , la grandeur notée Φ tel que :

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos(\vec{B}; \vec{S}) = NBS \cos\theta \quad \text{avec}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{unités SI : } B(T); S(m^2); \Phi \text{ en Webers(Wb)} \\ \vec{n} \text{ est le vecteur unitaire normal (perpendiculaire) à la surface} \end{array} \right.$$

$\vec{n}$ est le vecteur unitaire normal (perpendiculaire) à la surface



Le flux magnétique est une **grandeur algébrique** :

- ❖ Si $\theta = (\vec{B}; \vec{S}) = 0$, alors $\cos\theta = 1$, d'où $\Phi = NBS$: on dit que **le flux est maximal**
- ❖ Si $\theta = (\vec{B}; \vec{S}) = \pi/2$, alors $\cos\theta = 0$, d'où $\Phi = 0$: **le flux est nul**
- ❖ Si θ est **aigu** c'est - à - dire $0 < (\vec{B}; \vec{S}) < \pi/2$, alors $\cos\theta > 0$, d'où $\Phi > 0$
- ❖ Si θ est **obtus** c'est - à - dire $(\vec{B}; \vec{S}) > \pi/2$, alors $\cos\theta < 0$, d'où $\Phi < 0$

Exercice d'application 1

Un cadre rectangulaire de longueur $a = 20 cm$ et de largeur $b = 10 cm$ comporte **1000 spires** et est placé dans une région où règne un champ magnétique d'intensité $B = 0,2 T$.

- a) Calculer le flux magnétique à travers le cadre si $\vec{B}$ est **colinéaire et de même sens** que la surface du cadre

$$\text{Cadre rectangulaire} \Rightarrow S = a \times b \Rightarrow \Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBab \cos(\vec{B}; \vec{S}) = NBab \cos\theta \text{ or } \theta = 0^\circ$$

$$\Rightarrow \Phi = NBab \cos 0^\circ \Rightarrow \Phi = NBab \quad \text{A.N.:} \quad \Phi = 1000 \times 0,2 \times 20 \times 10^{-2} \times 10 \times 10^{-2}$$

$$\Phi = 4 Wb$$

- b) Calculer le flux magnétique à travers le cadre si $\vec{B}$ est **orthogonal** à la surface $\vec{S}$ du cadre

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBab \cos(\vec{B}; \vec{S}) = NBab \cos\theta \text{ or } \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Phi = NBab \cos \frac{\pi}{2} = 0$$

$$\Phi = 0 Wb$$

Exercice d'application 2

Un solénoïde formé de **3000 spires** est parcouru par un courant d'intensité $I = 0,5 A$. Il est fabriqué à partir d'un fil de diamètre $d = 0,8 mm$.

- a) Calculer la longueur L du solénoïde

$$L = N \cdot d \quad \text{A.N.:} \quad L = 3000 \times 8 \times 10^{-4} = 2,4$$

$$L = 2,4 m$$

- b) Calculer l'intensité du champ magnétique B au centre du solénoïde

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{NI}{L} \quad \text{A.N.:} \quad B = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{3000 \times 0,5}{2,4} = 7,85 \times 10^{-4}$$

$$B = 7,85 \times 10^{-4} T$$

- c) Calculer le flux magnétique à travers le solénoïde si ce dernier a un diamètre de **20 cm**.

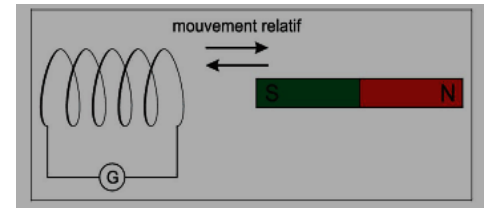
$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBab \cos(\vec{B}; \vec{S}) = NBS \cos\theta \text{ or } \theta = 0^\circ \Rightarrow \Phi = NBS$$

$$\text{La surface du solénoïde est circulaire} \Rightarrow S = \pi R^2 = \pi \frac{D^2}{4}, \text{ donc } \Phi = \frac{\pi D^2 NB}{4} \quad \text{A.N.:} \quad \Phi = 7,4 \times 10^{-2} Wb$$

2- Induction électromagnétique

a) Expérience

Lorsqu'on approche le pôle Nord de l'aimant de la bobine, l'aiguille du galvanomètre G dévie dans un sens. Lorsqu'on l'en éloigne, elle dévie dans l'autre sens. Lorsqu'on permute les pôles de l'aimant, le sens de déviation de l'aiguille s'inverse également.



b) Interprétation

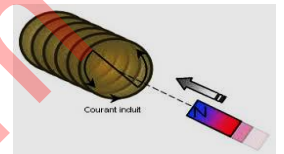
La bobine, bien que n'étant pas reliée à un générateur, est parcourue par un courant. En déplaçant l'aimant, on fait varier l'intensité du champ magnétique et donc le flux magnétique à travers la bobine.

Cette **variation du flux magnétique** crée aux bornes de la bobine, un **courant induit** : Ce phénomène porte le nom **d'induction électromagnétique**. La bobine se comporte donc comme un **générateur** : le circuit est siège d'une force électromotrice appelée **force électromotrice induite** et est appelé **circuit induit** tandis que l'aimant qui crée ce courant est appelé **inducteur**.

c) Sens du courant induit : Loi de Lenz

L'expérience montre que les sens des courants sont tels que la face de la bobine s'oppose au déplacement de l'aimant.

Exemple : lorsqu'on approche la face Nord de l'aimant, la bobine présente une face Nord et le courant y circule dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.



Enoncé de la loi de Lenz : « Le sens du courant induit est tel que, par ses effets électromagnétiques, il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. ».

d) Expression de la f.é.m. induite : Loi de Faraday

Tout circuit électrique soumis à une variation de flux $\Delta\Phi$ est le siège d'une f.é.m. induite e d'expression :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ avec } \begin{cases} d\Phi \text{ en Webers (Wb)} \\ dt \text{ en secondes (s)} \\ e \text{ en Volts (V)} \end{cases}$$

Remarques

- ❖ Le signe $-$ traduit la loi de Lenz et e est la f.é.m. induite instantanée.
- ❖ $e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(NBS \cos \omega t)}{dt} = -NBS \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = -NBS(-\omega \sin \omega t) = N.B.S.w \sin \omega t$.
- ❖ e est **maximale** si $\sin \omega t = 1$, d'où $e_{\max} = N.B.S.w$
- ❖ La **f.é.m. induite moyenne** est : $e_{\text{moy}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{(\Phi_f - \Phi_i)}{(t_f - t_i)}$.

Exercice d'application

Un cadre rectangulaire de longueur $a = 20 \text{ cm}$ et de largeur $b = 10 \text{ cm}$ et comportant **50 spires** est placé dans une région où règne un champ magnétique d'intensité $B = 2,2 \text{ T}$ et **perpendiculairement** aux lignes de champ. Un dispositif permet d'annuler le courant dans le cadre en **0,8s**.

1- Déterminer la f.é.m. induite moyenne

$$e_{\text{moy}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{(\Phi_f - \Phi_i)}{(t_f - t_i)} \text{ or } \Phi_f = 0 \text{ car courant annulé et } \Phi_i = N B a b \cos 0^\circ = a.b.N.B$$

$$\Rightarrow e_{\text{moy}} = - \frac{(0 - abNB)}{\Delta t} \Rightarrow e_{\text{moy}} = \frac{abNB}{\Delta t}$$

2- Ce cadre tourne à la vitesse angulaire de rotation ω

a) Montrer que le flux à travers le cadre est : $\Phi = a.b.N.B \cos \omega t$

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos(\vec{B}; \vec{S}) = NBS \cos \theta \text{ or } \omega = \frac{\theta}{t} \Rightarrow \theta = \omega.t \Rightarrow \Phi = NBS \cos \omega t$$

b) Déterminer l'expression de la f.é.m. induite instantanée

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(NBS \cos \omega t)}{dt} = -NBS \frac{d(\cos \omega t)}{dt} = -NBS(-\omega \sin \omega t) = NBS \omega \sin \omega t = a.b.N.B.w \sin \omega t$$

c) En déduire la valeur maximale de cette f.é.m. induite e est max si $\sin \omega t = 1 \Rightarrow e_{\max} = a.b.N.B.w$

d) Le cadre a une résistance R . En déduire l'expression du courant induit i .

$$\text{D'après la loi de Pouillet, } i = \frac{e}{R} \Rightarrow i = \frac{a.b.N.B.w}{R}$$

III- AUTO-INDUCTION

Tout circuit parcouru par un courant crée un champ magnétique (donc un flux) à travers lui-même appelé **flux propre**.

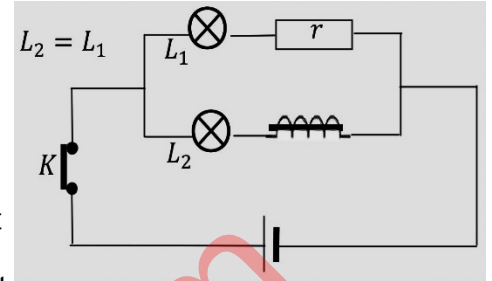
Si l'intensité du courant dans le circuit varie, alors le flux propre varie. Toute variation du flux à travers un circuit crée une f.é.m. d'induction. Ce phénomène dans lequel le circuit est à la fois l'inducteur et l'induit porte le nom **d'auto-induction**.

L'**auto-induction** est donc un phénomène d'apparition d'une f.é.m. induite lorsqu'un circuit subit une variation de son flux propre.

1- Mise en évidence

a) Expérience

L_1 et L_2 sont identiques. Le résistor et la bobine ont même résistance r . On a placé un barreau de fer doux à l'intérieur de la bobine afin d'augmenter le flux propre.



❖ Lorsqu'on ferme l'interrupteur K, la lampe L_1 éclaire instantanément tandis que la lampe L_2 brille **progressivement**.

❖ Lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, la lampe L_1 s'éteint instantanément tandis que la lampe L_2 s'éteint **progressivement**.

b) Interprétation

Lorsqu'on ferme le circuit, la **variation du flux propre** dans la bobine crée une f.é.m. d'induction qui s'oppose à l'établissement du courant.

Lorsqu'on ouvre le circuit, la f.é.m. d'induction s'oppose à la disparition du courant.

2- Auto-induction

Dans un circuit, le flux propre a pour expression :

$$\Phi = L \cdot i \quad \text{avec} \quad \begin{cases} L: \text{Auto-inductance ou simplement inductance en Henrys (H)} \\ i: \text{Intensité du courant induit en Ampères (A)} \end{cases}$$

3- F.é.m. d'auto-induction

La F.é.m. d'auto-induction s'exprime en fonction de l'inductance par la relation :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

IV- ALTERNATEURS

Un **alternateur** est un générateur de courant alternatif.

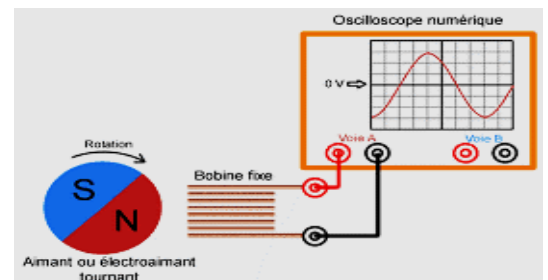
1- Principe d'un alternateur

Pour avoir un alternateur, il suffit de faire tourner un aimant au voisinage d'une bobine dans laquelle va naître un courant induit à cause de la variation du flux. Ce courant « induit » est récupéré à la sortie de l'alternateur et utilisé.

Un alternateur est constitué de deux principales parties :

- ❖ Un aimant inducteur appelé **rotor**
- ❖ Une bobine fixe (circuit induit) appelée **stator**.

Remarque : Dans certains alternateurs, l'aimant peut être fixe (**stator**) et la bobine mobile (**rotor**).



2- Quelques exemples d'alternateurs

- ❖ Dynamo ou alternateur de bicyclette
- ❖ Alternateurs industriels

3- Sources de courant alternatif au Cameroun

Les principales sources de courant alternatif au Cameroun sont les centrales hydroélectriques, notamment :

- ❖ Celles d'Edéa et de Song-Loulou sur la Sanaga
- ❖ Celle de Lagdo sur la Bénoué

Il existe aussi des centrales thermiques telles que :

MODULE 4 : ASPECTS ENERGETIQUES DES CIRCUITS ELECTRIQUES

- ❖ Celles d'Oyom-Abang à Yaoundé, de Logbaba à Douala et de Bertoua
- ❖ La Centrale de fuel lourd de Limbé
- ❖ Des groupes électrogènes constitués d'un moteur à combustion et d'un alternateur.

JEU BILINGUE

In french	En anglais
Aimant	Magnet
Champ magnétique	Magnetic field
Induction électromagnétique	Electromagnetic induction
Alternateur	Alternator
Courant alternatif	Alternative Current (AC)

RETOUR A LA SITUATION D'ENTREE

- **B et I sont proportionnels** car le graphe est une droite passant par l'origine du repère, donc $B = a \cdot I$
 $a = \frac{\Delta B}{\Delta I} = \frac{(4-0) \times 10^{-3}}{2-0} = 2 \cdot 10^{-3}$, d'où $B = 2 \times 10^{-3} \cdot I$
- **Nombre N de spire** : $B = \mu_0 \times \frac{N}{L} \cdot I = 2 \times 10^{-3} \cdot I \Rightarrow N = \frac{2 \times 10^{-3}}{\mu_0} \cdot L = 796$ $N = 796 \text{ spires}$