

# Equipement Electrique

ITEEM 1<sup>ère</sup> Année

Equipement Electrique, ITEEM 1 ere année, Bruno FRANÇOIS

Introduction

## Le programme

- \* Champ magnétique, flux, induction électromagnétique, charges électriques et forces
- \* La machine à courant continu
- \* Convertisseurs de l'électronique de puissance pour la vitesse variable
- \* Étude d'un système d'entraînement

Cours 7h (06 avril, 10h15+1h30 et 08 avril 13h30+1h30)

TD 4H

1 TP

## Mise en garde

Dans ce cours, il peut exister des notations différentes pour une même variable

3

## Déroulement du cours

### • Vidéo show

- Transparents du cours sur feuille individuelle
- Classeur (transparents, feuilles de notes, sujets et feuilles de TD)

### • Pendant le cours

- Ecoute attentive, Prendre des notes, Encadrer ce qui est important
- Pas de bavardages (même pour des soucis matériels)
- Pas de questions
- Repérer ce que vous n'avez pas compris sur l'instant
- 5 min avant la fin du cours, posez vos questions

### Ce soir

- Relire le cours
- Repérer ce que vous n'avez pas compris

4

## Déroulement des TDs

\* **Avant d'arriver**, connaître le cours et préparez le premier exercice

\* **Faire l'exercice donné**

Pendant ce temps,

- \_ Interroger le professeur sur des points du cours non compris
- \_ Si OK, faites l'exercice suivant

\* Bavardage toléré, mais

Soyez discrets !

N'oubliez jamais que des camarades travaillent

\* **Après le TD**, êtes vous capable de refaire par vous même les exercices ?

5

## Déroulement des TPs

\* 1 séance de 3h45 sur la machine à courant continu

\* Par binôme

\* Avant le TP,

- \_ Lire une fois le sujet !
- \_ Une préparation théorique est à faire

\* Pendant le TP

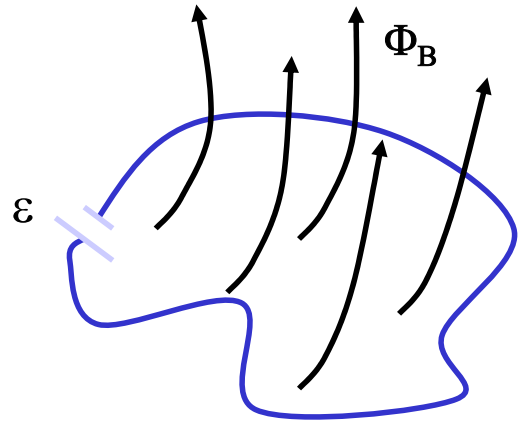
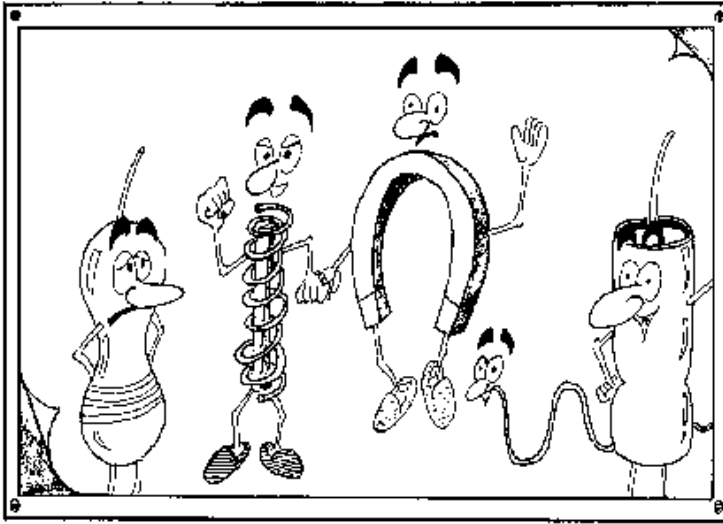
- \_ Inverser vos tâches : Câblage/rédaction du compte-rendu

\* 1/4 d'heure avant la fin du TP, relisez le compte-rendu

- \_ Fautes d'orthographe
- \_ Les unités
- \_ Nom de l'enseignant, ...

6

# Champ magnétique, flux, induction électromagnétique



## PLAN

Champ magnétique

Définition et calcul du flux

L'induction électromagnétique

Loi de Faraday

Loi de Lenz

Applications

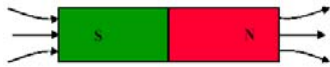
## Source naturelle de champ magnétique : l'aimant

Aimants permanents : matériaux magnétiques qui exercent des force entre eux et sur le Fer, le Nickel,, le Cobalt et différents alliiages dits ferromagnétiques.



Un pôle Nord est toujours accompagné d'un pôle

Il n'existe pas de monopôles magnétiques !

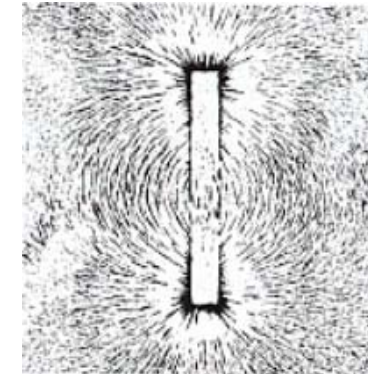
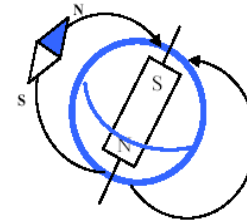


3

Définition d'un vecteur champ magnétique  $\vec{B}$  :

\_ Orientation du : du Nord vers le Sud à l'**extérieur de l'aimant**

\_ Module, valeur du champ en Tesla



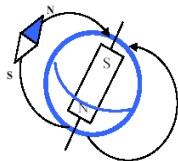
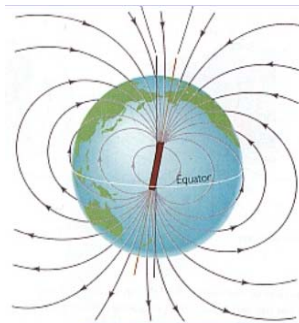
Lignes de champ matérialisées par de la limailles de Fer

La tangente en un point à une ligne de champ donne la direction que prendrait un second aimant placé en ce point

4

## Source naturelle de champ magnétique : la Terre

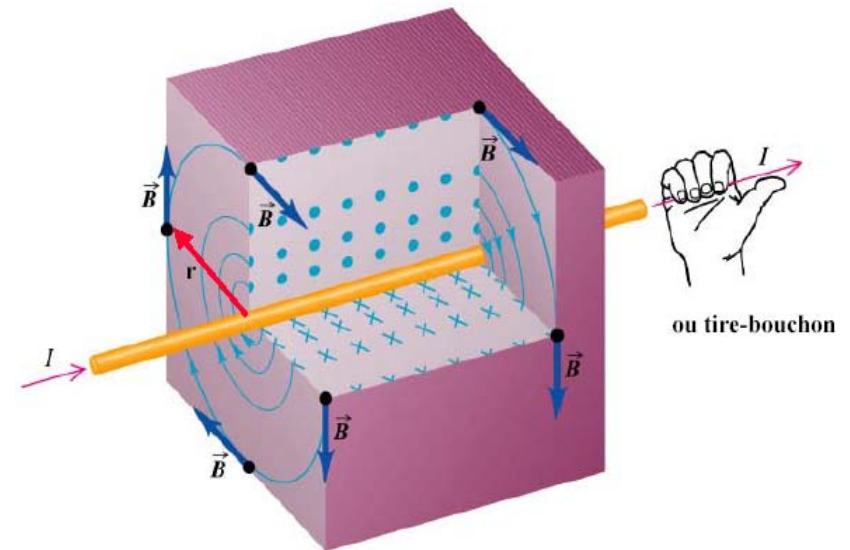
Le pôle Nord d'un aimant pointe vers le nord géographique qui est un pôle Sud magnétique



5

## Champ magnétique produit par un fil

➔ Lignes de champ: cercles centrés sur le fil, de rayon  $r$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

6

## Champ magnétique produit par un fil

Cas d'un fil infini (intérieur et extérieur)

- Par symétrie, le champ magnétique n'ayant pas de sources, les lignes de champ sont des cercles centrés sur le fil et  $|B|$  ne dépend que du rayon  $r$  qui est l'éloignement.

- Le vecteur **excitation magnétique**  $\vec{H}$ :

Il permet d'accéder à l'expression de B et ne dépend que du circuit électrique.

Dans le vide :  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  est la perméabilité magnétique du vide

Dans un matériau (ferromagnétique) :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

$\mu_r$  est la perméabilité relative du matériau

n'est pas toujours une constante

7

## Champ magnétique produit par un fil

Cas d'un fil infini (intérieur et extérieur)

- Théorème d'Ampère :**

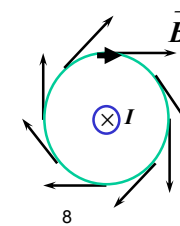
La circulation du vecteur excitation magnétique  $\vec{H}$  le long d'un contour fermé est égale à la somme algébrique des courants électriques qui traversent la surface limitée par le contour.

$$\oint_{\text{Contour}} \vec{H} d\vec{l} = \sum_k \pm i_k$$

Dépend du signe du courant  $i_k$

- Application :**

Calcul du champ magnétique produit sur le parcours défini par le cercle de rayon  $r$  centré sur le fil.



Application : Calcul du champ magnétique produit sur le parcours défini par le cercle de rayon  $r$  centré sur le fil.

- L'intégrale de la loi d'Ampère est simple :  $\oint_{\text{Contour}} \vec{H} d\vec{l} = \int_{\text{contour}} \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} d\vec{l} = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} (2\pi r)$

- Le courant entouré par le parcours est =  $i$

- Théorème d'Ampère :

$$\oint_{\text{Contour}} \vec{H} d\vec{l} = \sum_k \pm i_k$$



Donc ...

⇒



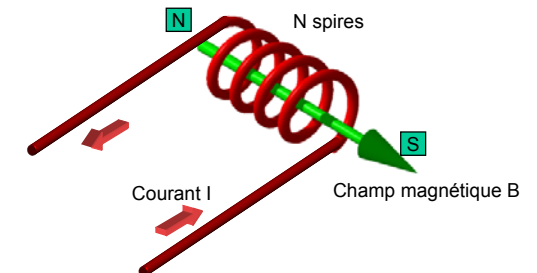
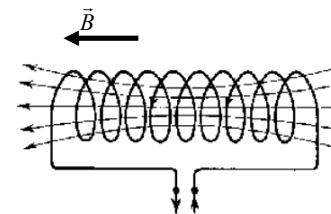
Le champ magnétique est proportionnel au courant

9

## Champ magnétique produit par une bobine

Le champ d'induction est produit par un électro-aimant fixe appelé inducteur, ou un aimant permanent.

Lorsqu'un courant quelconque, d'intensité  $i$ , parcourt un circuit placé dans l'air loin de toute masse de fer, il crée dans l'espace environnant un champ magnétique dont l'intensité  $B$  est proportionnelle à  $i$ .

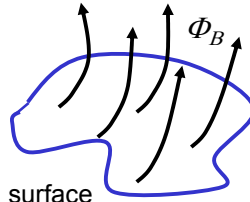


10

### Définition et calcul du flux

- Définition du flux :  
**Champ magnétique total traversant une surface**

- Le champ magnétique peut avoir une direction quelconque dans l'espace.  
On ne considère que la composante orthogonale à la surface



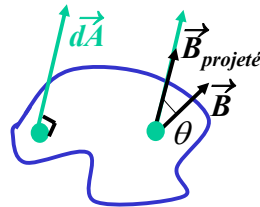
$\vec{dS}$ , vecteur orthogonal à la surface

- Le flux  $\Phi_B$  se calcule en faisant la **somme sur la surface** du produit suivant :

(projection de  $B$  sur  $dA$ )  $\times$  (élément d'aire  $dA$ )

$$d\Phi_B = \vec{B}_{\text{projeté}} \cdot d\vec{S} =$$

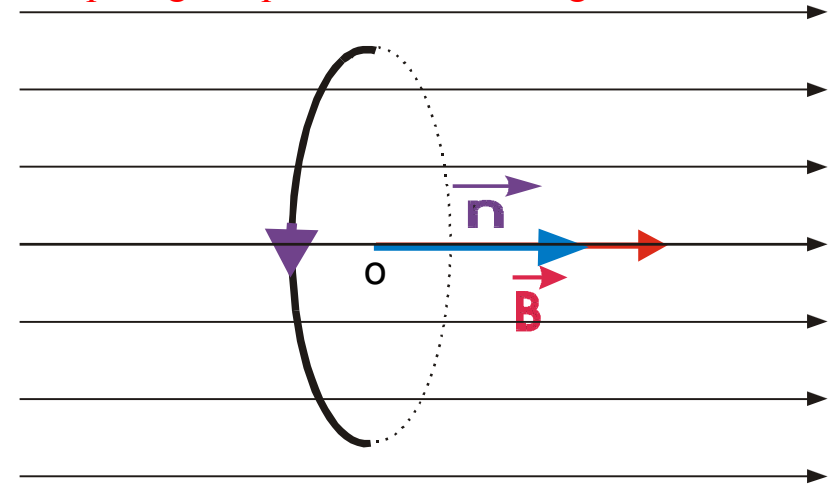
$$\Phi_B = \iint_{\text{Surface}} d\Phi_B = \iint_{\text{Surface}} \vec{B}_{\text{projeté}} \cdot d\vec{S}$$



11

### Définition et calcul du flux

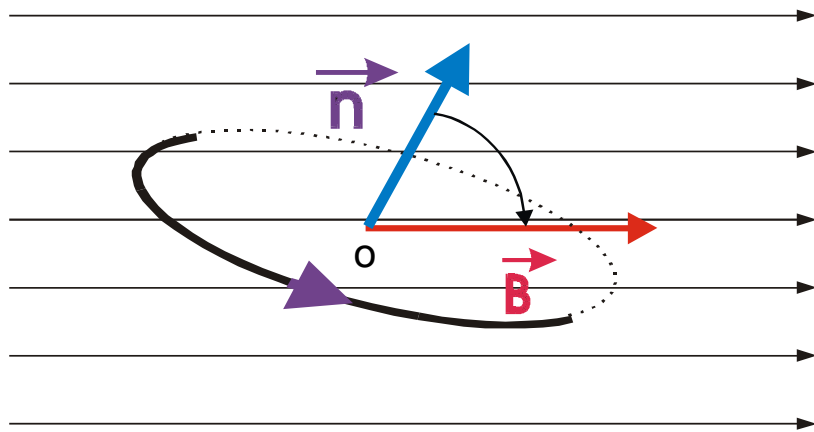
#### Champ magnétique uniforme orthogonal à la surface



$$\Phi_B = B \cos(0) A$$

12

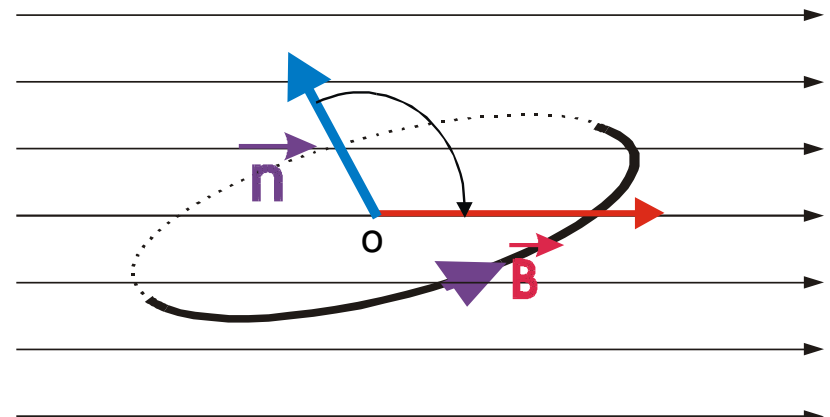
### Définition et calcul du flux



$$\Phi_B = B \cos(\text{angle}) A > 0$$

13

### Définition et calcul du flux

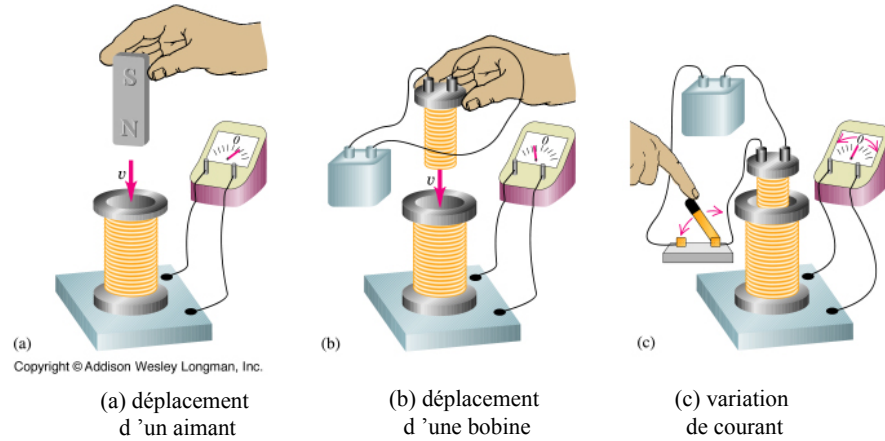


$$\Phi_B = B \cos(\text{angle}) A < 0$$

14

## L'induction électromagnétique

- L'induction électromagnétique est la **création d'une source de tension dans un circuit en utilisant un flux magnétique variable.**

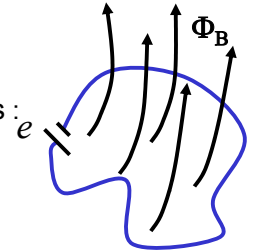


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

15

## Loi de Faraday

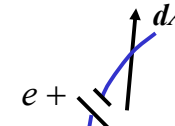
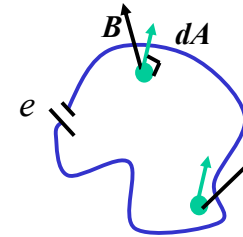
- En cas de variation du flux magnétique à l'intérieur de ce circuit, il apparaît une tension  $e$
- L'amplitude de la tension induite est égale à la variation du flux magnétique par rapport au temps :



Un chemin conducteur

Convention pour attribuer le signe à la f.e.m. :

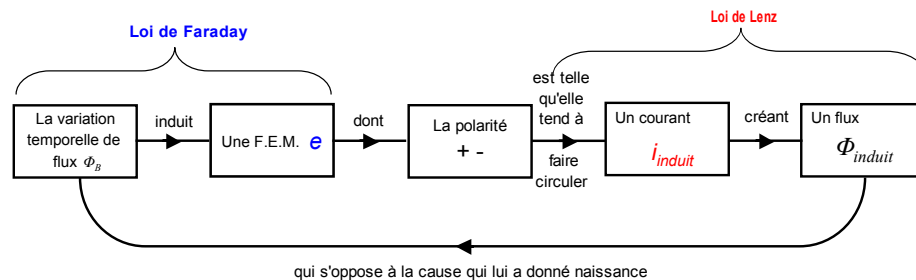
- \_ le pouce de la **main droite** indique la variation du champ magnétique
- \_ l'index la polarité positive de la f.e.m.



16

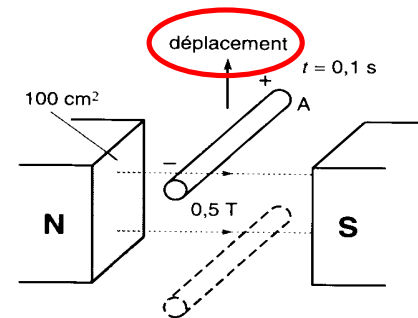
## Loi de Lenz

- L'induction produit des effets (fem  $E$ ) qui
- Si la variation du flux magnétique est mécanique on dit que la tension est une force contre électromotrice (qui s'oppose au déplacement)



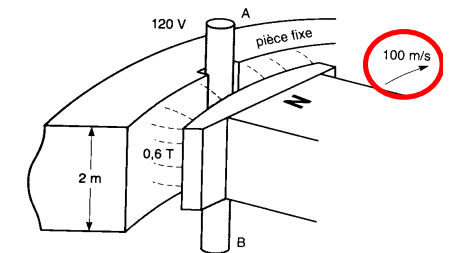
17

## Exemples d'induction due à un variation de flux coupé



Le déplacement d'un élément dans la champ magnétique produit à ses bornes une tension.

Dans l'élément qui se déplace, il y a une variation de flux



Lors de la rotation de l'aimant, le flux magnétique dépend de l'angle.

Cette variation de flux va induire une tension.

18

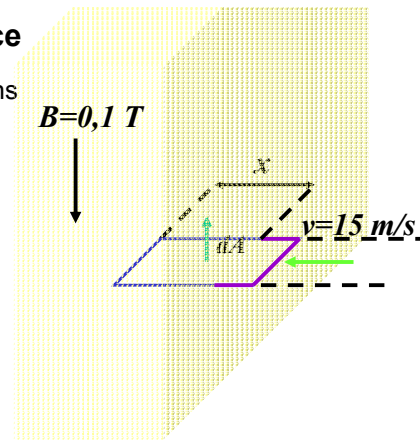
### Exercice

• Un champ magnétique uniforme existe dans une moitié de l'espace.

On entre dans ce champ un conducteur rectangulaire à vitesse constante.

Quelle est la **valeur** de la f.c.e.m. ?

$$\Phi_B = \int_{\text{aire}} B dA = -Blx$$



Application numérique : largeur 0,3m, vitesse 15m/s

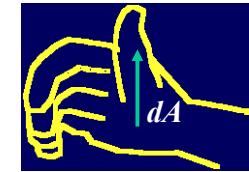
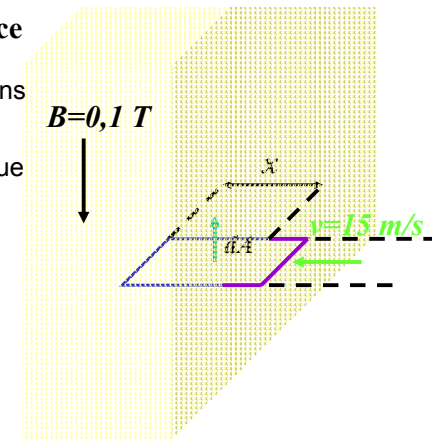
### Exercice

• Un champ magnétique uniforme existe dans une moitié de l'espace.

On entre dans ce champ un circuit électrique rectangulaire à vitesse constante.

Quelle est le **sens** de la tension induite ?

Tout se passe comme si on avait une pile de 0,45 V branchée ainsi :



### • Effet de la tension induite :

La tension induite s'oppose à la cause qui lui a donné naissance

La tension **induite** crée un courant **induit** qui génère un champ magnétique **induit** qui s'oppose au champ magnétique original



### Exercice

• Si le conducteur a une résistance  $R = 9 \Omega$ , le courant induit vaut :

dans le sens antihoraire.

• Calcul de la puissance :



## Applications de l'induction

### •Générateur alternatif

(Ex : Centrale hydraulique)

L'eau tourne une roue

- qui tourne un électro-aimant
- ce qui change le flux
- et induit une fém

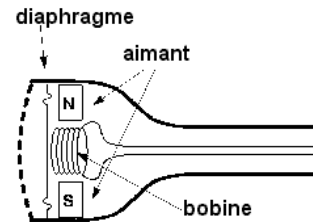


### •Microphone dynamique

(Ex : certains téléphones)

Le son

- crée des variations de pression
- qui font osciller le diaphragme et la bobine
- ce qui fait varier le flux
- ce qui crée une fém variable qui «suit» le son

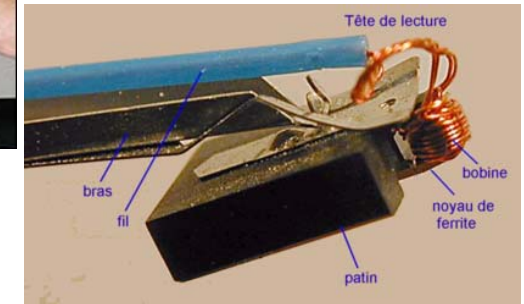


23

## Applications de l'induction

### • Lecture d'un ruban magnétique, d'un disque dur de basse densité, d'une carte de débit ou de crédit...

- L'information prend la forme d'une aimantation variable d'un matériau magnétisable qui recouvre la surface du ruban, du disque...
- De minuscules bobines réagissent aux changements de flux quand la surface défile sous elles ou quand elles se déplacent sur la surface.

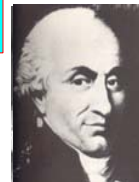


24

## Charges électriques et forces

Expérience

Il existe des forces qui agissent sur les *charges* électriques (+/-)



Coulomb



Lorentz

La force qui s'exerce sur une charge:

- ⇒ est *proportionnelle* à la charge  $q$
- ⇒ dépend de la *position* de la charge
- ⇒ dépend de la *vitesse* de la charge

25

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.1 Forces d'Ampère

Placées dans un champ magnétique, des charges électriques ne subissent aucune force.

Par contre, les charges électriques en mouvement sont soumises à des forces magnétiques appelées forces d'Ampère.



André-Marie Ampère

26

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.1 Forces d'Ampère

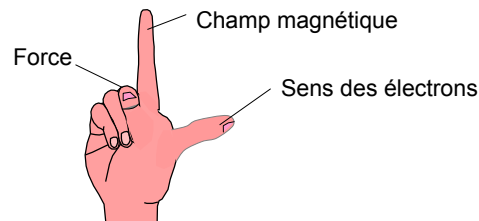
Si ces charges sont animées d'une vitesse (le support de ce vecteur indiquant la direction des charges), alors cette force s'exprime comme le produit vectoriel suivant :

$$\vec{F} = q (\vec{v} \nabla \vec{B})$$

$\vec{B}$  étant un vecteur ayant la direction de la ligne d'action du champ magnétique, unité le Tesla

$q$  est la charge électrique élémentaire.

#### Règle des trois doigts de la main droite

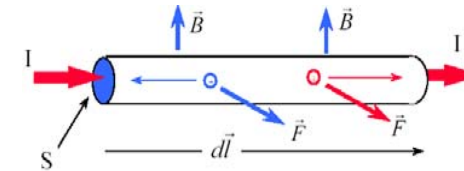


27

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.2 Loi de Laplace

Si, maintenant, on considère le courant produit par l'ensemble de ces charges, alors, la loi de Laplace permet de définir la force résultante.

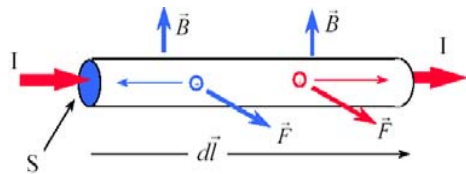


Un élément de courant  $i \cdot d\vec{l}$  (intensité  $i$ , de longueur  $dl$ ),

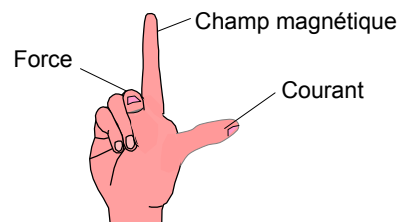
placé dans un champ magnétique d'induction  $\vec{B}$  (origine indépendante de  $i \cdot dl$ ),

est soumis à l'action d'une force (dite force de Laplace) d'expression :

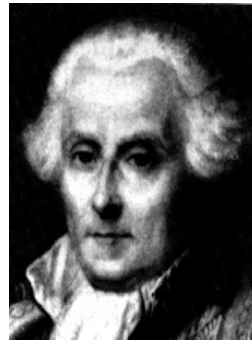
28



#### Règle des trois doigts de la main droite

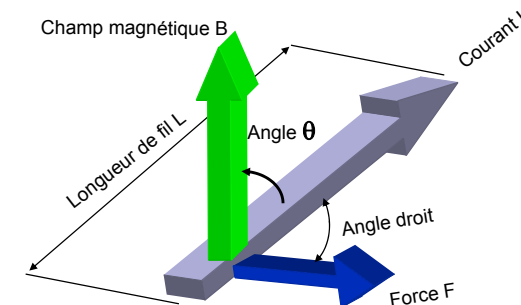


29



## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.2 Loi de Laplace

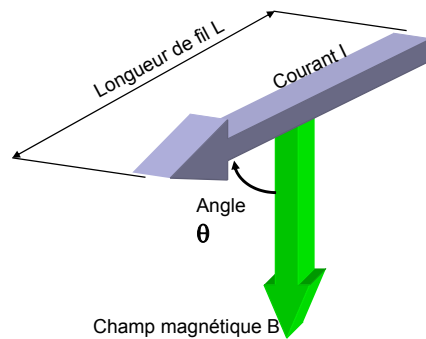


Lorsque  $i$  et  $B$  sont perpendiculaires, la force est perpendiculaire. Cela est réalisé **par construction** dans les machines électriques

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.2 Loi de Laplace

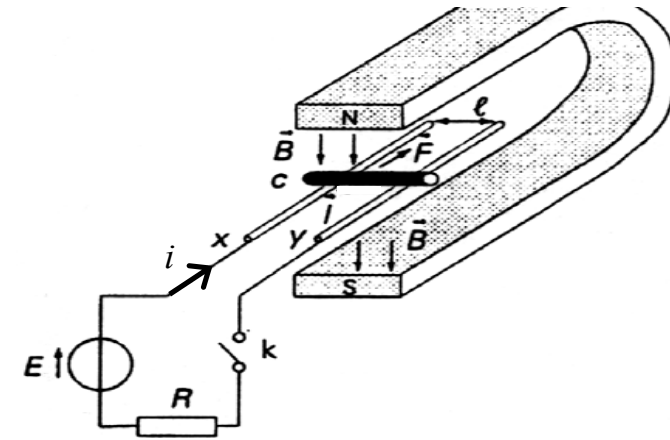
Dessinez la force de Laplace.



31

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

### 2.2 Loi de Laplace : Expérience

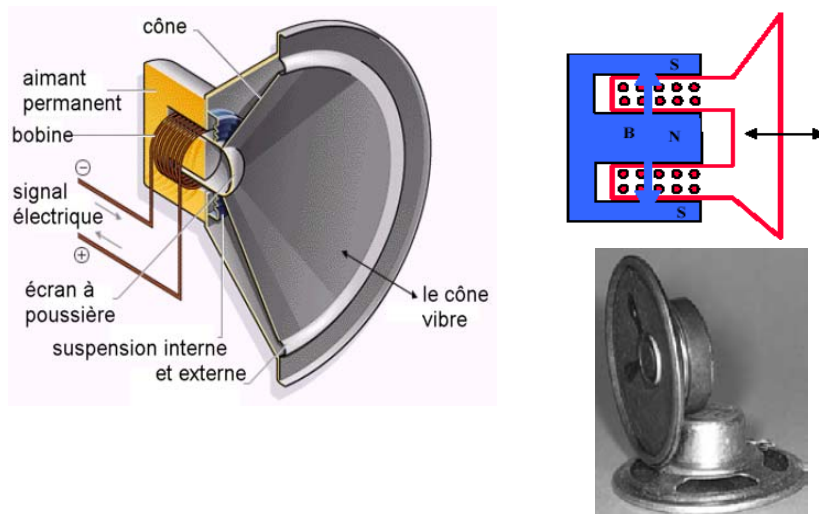


Le travail virtuel exercé par le couple (l'ensemble) des forces de Laplace (C) pour réaliser un déplacement angulaire  $dx$  s'écrit :

$$dT = C \cdot dx$$

## Actions magnétiques des charges électriques en mouvement

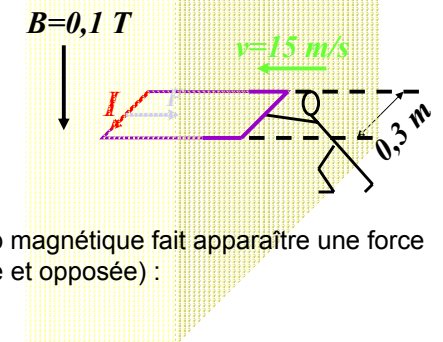
### 2.2 Loi de Laplace : Applications le Haut parleur



33

### Application à l'exercice précédent

$$I_{\text{induit}} = \frac{e}{R} = \frac{0,45V}{9\Omega} = 0,05A$$



• L'existence de ce courant dans le champ magnétique fait apparaître une force de Laplace  $F$  (de freinage, de valeur égale et opposée) :

• Pour maintenir le mouvement et le courant induit, un agent extérieur doit équilibrer la force  $F$ . Cet agent fait un travail et fournit une puissance  $P$  :

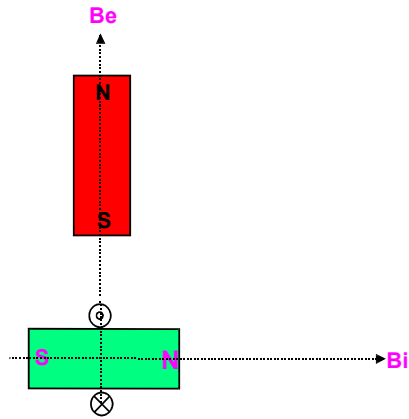
**La puissance est conservée !**

34

## Création d'un mouvement de rotation

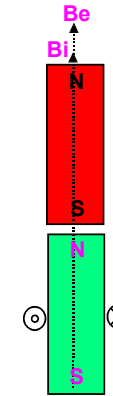
Soit un aimant permanent produisant un champ d'excitation  $B_e$  et une spire parcourue par un courant continu produisant un champ  $B_i$ .

*Qu'observe-t-on ?*



35

## Un effort d'attraction



Mais le mouvement reste limité à cette nouvelle position stable.

### Conclusion:

Il faut,

malgré le mouvement produit,

maintenir le décalage des 2 champs

pour entretenir un effort d'attraction continu tournant

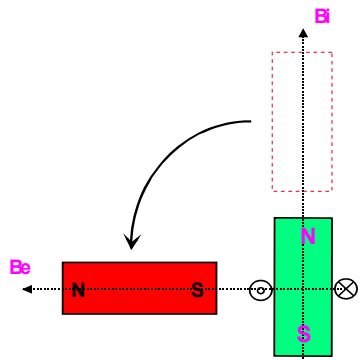
et ainsi produire une rotation.

36

## Création d'un mouvement rotatif entretenu

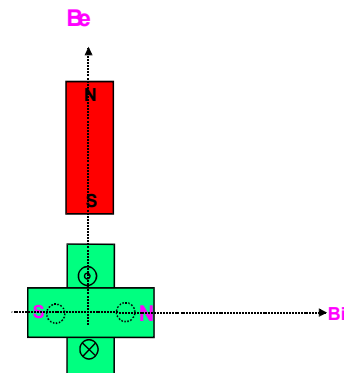
Un couple de force est créé par l'interaction de deux champs magnétiques

On fait tourner le champ d'excitation  $B_e$ .  
Par attraction, le champ d'induit  $B_i$  tourne.



*Principe des machines à champ tournant par courants alternatifs.*

Si le champ d'excitation  $B_e$  est fixe,  
le champ d'induit  $B_i$  doit changer



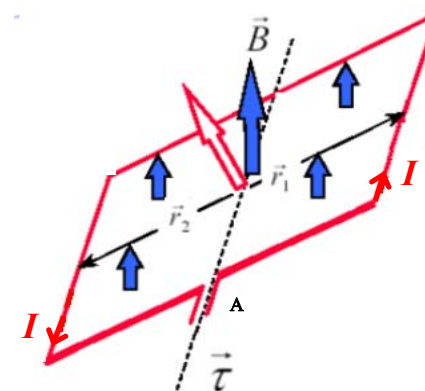
*Principe des machines à champ fixe par courant continu et aiguillage de ce courant.*

37

## Force sur un cadre de courant

Un cadre mobile autour d'un axe est placé dans un champ magnétique vertical uniforme  $B$  et est parcouru par un courant continu d'intensité  $I$ .  
Des forces de Laplace créent un couple qui provoque la rotation du cadre.

Dessinez les forces de Laplace lorsque le cadre est dans le demi plan supérieur :



$$\vec{F} = i (\vec{l} \times \vec{B})$$

Le moment de forces :

$$\vec{\tau} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$$

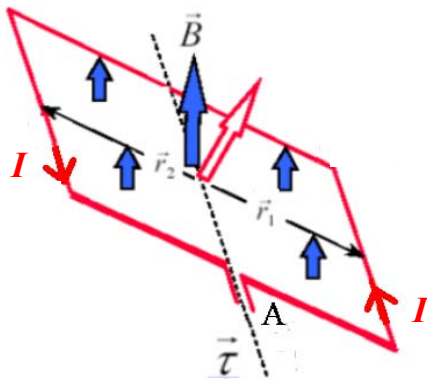
$$\tau = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \theta$$

38

### Force sur un cadre de courant

Si, grâce à la vitesse qu'il a prise, il arrive à tourner suffisamment pour quitter le plan horizontal.

Dessinez les forces de Laplace lorsque le cadre est dans le demi plan inférieur :



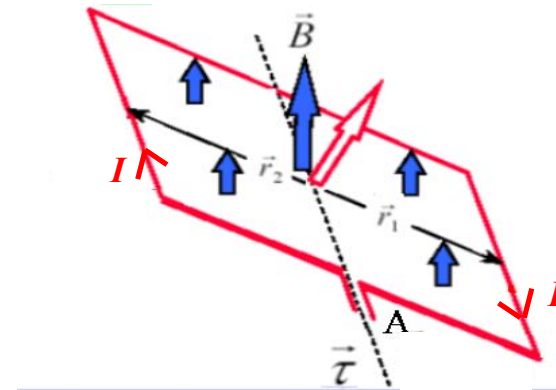
Les forces de Laplace vont le faire tourner dans l'autre sens, le cadre revient en arrière. Le cadre va se stabiliser sur la position horizontale.

39

### Force sur un cadre de courant

Pour que la cadre continue son mouvement de rotation dans le même sens, le courant doit être inversé quand le cadre passe par la position horizontale.

Dessinez les forces de Laplace lorsque le cadre est dans le demi plan inférieur :

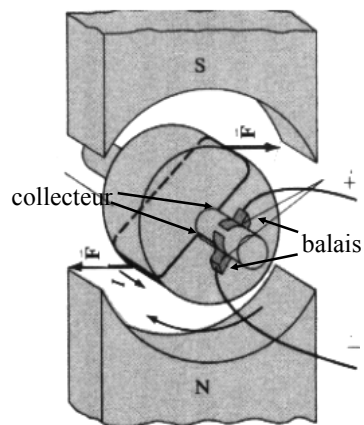


40

### Force sur un cadre de courant

Chaque fois que le rotor parcourt un demi tour, le courant est donc inversé pour que les forces soient appliquées toujours dans le même sens (de rotation)

#### Principe de l'orientation du courant



Ce sont des commutateurs et des balais qui s'occupent de ce changement.

Les balais sont fixes et permettent l'alimentation du circuit rotorique, tandis que les commutateurs tournent avec le rotor.

**Sous un pôle magnétique, le courant (et donc la force) est toujours orienté dans le même sens**

41