

Électromagnétisme

S19 Induction Électromagnétique

Iannis Aliferis

Université Nice Sophia Antipolis

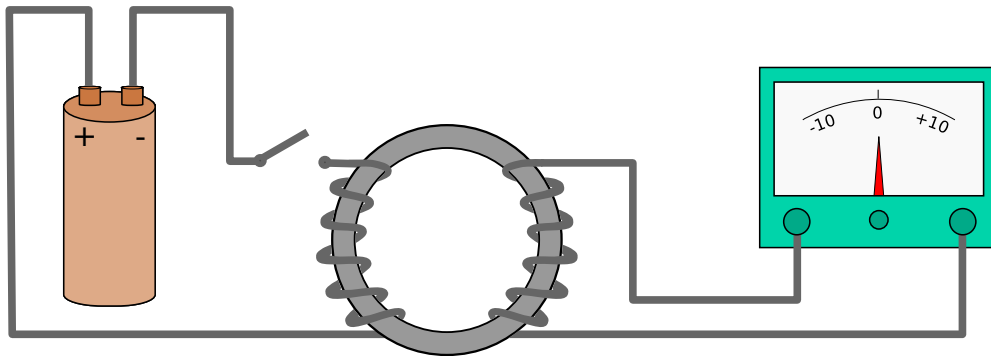
Induction électromagnétique	2
Expériences de Faraday	3
Loi de Faraday, forme intégrale	4
Circuit en mouvement	5
Aimant en mouvement	6
Champ magnétique variable	7
Loi de Faraday, forme intégrale	8
Loi de Faraday, forme locale	9
Loi de Faraday (forme locale)	10
Le champ électrique induit	11
Le champ électrique induit	12
Loi du flux magnétique	13
La loi du flux magnétique	14
Opposition fem / variation flux magnétique dans un circuit en mouvement	15
La fem s'oppose aux variations du flux magnétique.	16
La fem crée une force magnétique d'opposition	17
Loi de Lenz	18
La loi de Lenz	19

Induction électromagnétique

2

Expériences de Faraday

- ▼ Michael Faraday (1831)
- ▼ « Puisque I crée \vec{B} ... [loi Biot Savart] [loi Ampère]
est-ce que \vec{B} crée I ? »



- ▼ Conclusion : ce n'est pas \vec{B} qui crée I ...
mais les *changements* de \vec{B} !
- ▼ (Courant = électrons en mouvement)
- ▼ La *variation* de \vec{B} crée un champ \vec{E} !!!
- ▼ « Champ électrique *induit* »

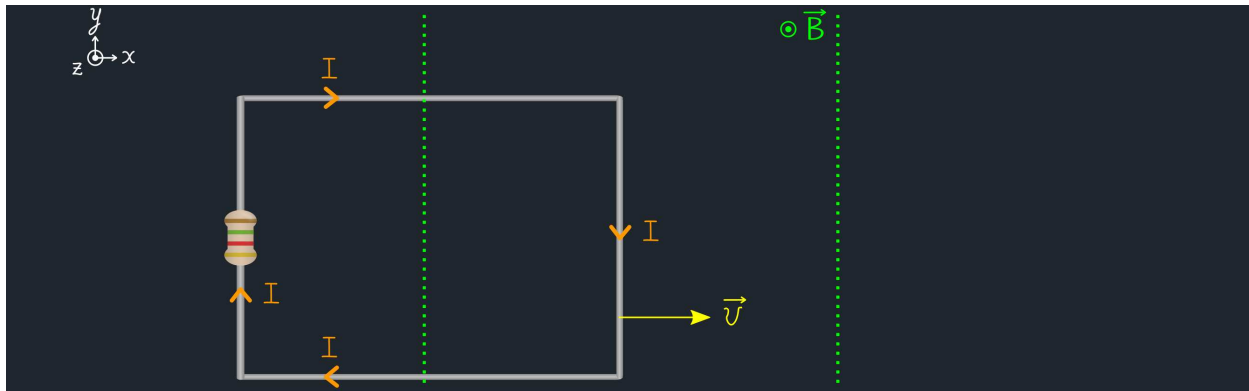
3



Loi de Faraday, forme intégrale

4

Circuit en mouvement



[fem circuit mouvement]

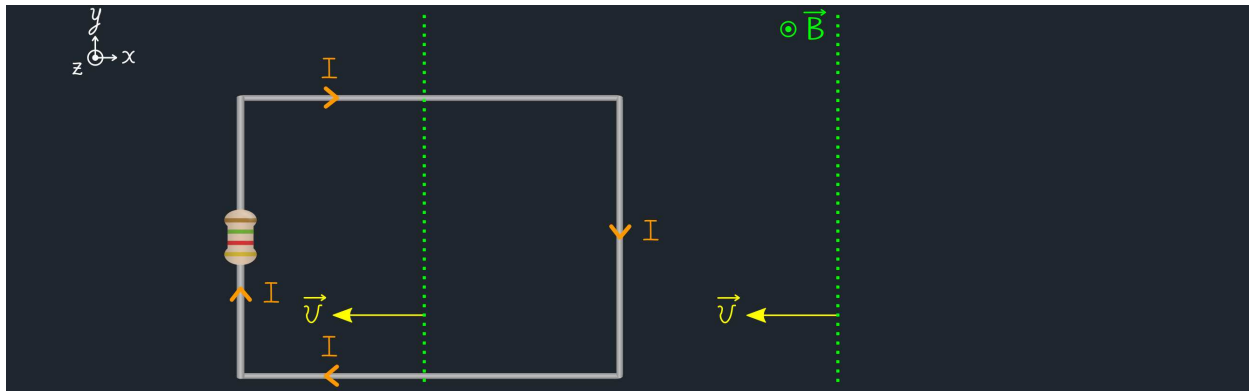
$$\text{fem}_1 = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- ▼ fem due au *mouvement*
- ▼ \vec{f} : force magnétique par charge
- ▼ (aucun nouveau phénomène)

5



Aimant en mouvement



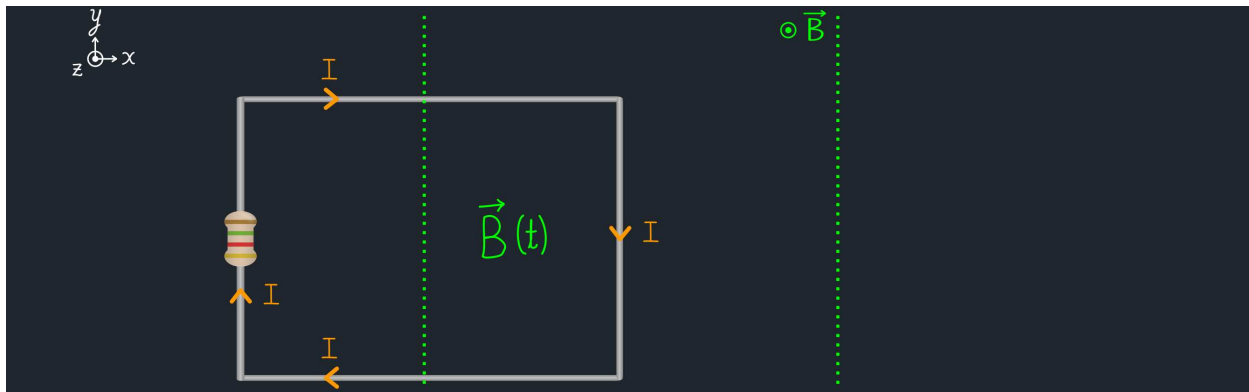
$$\text{fem}_2 = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\text{fem}_2 = \text{fem}_1$$

- ▼ Circuit au repos
- ▼ Pas de force magnétique !
- ▼ Quelle force sur les charges ?

6

Champ magnétique variable



$$\text{fem}_3 = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\text{fem}_3 = \text{fem}_2 = \text{fem}_1$$

- ▼ Circuit au repos
- ▼ Pas de force magnétique !
- ▼ Quelle force sur les charges ?

7



Loi de Faraday, forme intégrale

- ▼ Cas de champ magnétique *variable dans le temps*

$$\text{fem} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{f} \cdot \hat{t} \, dl = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS$$

- ▼ fem due à l'[induction]
 ▼ Force par charge : le champ électrique induit

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS \quad (1)$$

- ▼ $\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl \neq 0!!!$
 ▼ On ne peut plus définir un [potentiel électrostatique]
 ▼ [champ électrique induit] : non conservatif
 ▼ fem due au mouvement + induction : [loi flux magnétique]

8

Loi de Faraday, forme locale

9

Loi de Faraday (forme locale)

- ▼ [Loi Faraday intégrale] :

$$\oint_{\Gamma} \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot \hat{t} \, dl = - \int_S \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS$$

- ▼ Appliquer théorème de Stokes [théorème rotationnel] :

$$\int_S \vec{\text{rot}} \vec{E}(\vec{r}, t) \cdot \hat{n} \, dS = - \int_S \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS$$

pour toute surface ouverte S

- ▼ Loi de Faraday (forme locale) :

$$\vec{\text{rot}} \vec{E}(\vec{r}, t) = - \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (2)$$

- ▼ Le champ \vec{E} « tourne » autour de $-\partial \vec{B} / \partial t$
 [visualisation rotationnel]
 [pourquoi rotationnel]
 [champ électrique induit]

10



Le champ électrique induit

11

Le champ électrique induit

- ▼ [loi Faraday locale] Les variations de \vec{B} créent un champ \vec{E} induit
- ▼ Dans une région neutre ($\rho = 0$) :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- ▼ Analogie avec le champ \vec{B} en magnétostatique :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

- ▼ Les lignes du champ \vec{E} induit sont des boucles !
- ▼ Équivalences :

	\vec{B}	\vec{E} induit
rotationnel	$\mu_0 \vec{J}$	$-\partial \vec{B} / \partial t$
circulation	$\mu_0 I_{\text{enlacé}}$	$-d\Phi_B / dt$
	conducteur cylindrique	bobine $\vec{B}(t)$

12

Loi du flux magnétique

13

La loi du flux magnétique

- ▼ [fem mouvement flux magnétique] fem due au mouvement
- ▼ [loi Faraday intégrale] fem due à l'induction
- ▼ Deux phénomènes *différents** dans la même équation

$$\text{fem} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{loi de Faraday} \quad \text{du flux magnétique} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{fem}(t_0) &= -\frac{d\Phi_B}{dt} \Big|_{t_0} = -\frac{d}{dt} \left(\int_{S(t)} \vec{B}(t) \cdot \hat{n} \, dS \right) \Big|_{t_0} \\ &\stackrel{\text{sans démo}}{=} - \int_{S(t_0)} \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS - \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{S(t)} \vec{B}(t_0) \cdot \hat{n} \, dS \right) \Big|_{t_0} \\ &\stackrel{\text{sans démo}}{=} \underbrace{- \int_{S(t_0)} \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot \hat{n} \, dS}_{\text{fem induction } (\vec{f} = \vec{E}_{\text{ind}})} + \underbrace{\oint_{\Gamma(t_0)} (\vec{v} \wedge \vec{B}(t_0)) \cdot \hat{t} \, dl}_{\text{fem mouvement } (\vec{f} = \vec{v} \wedge \vec{B})} \end{aligned}$$

- ▼ * la Relativité Spéciale commence ici !

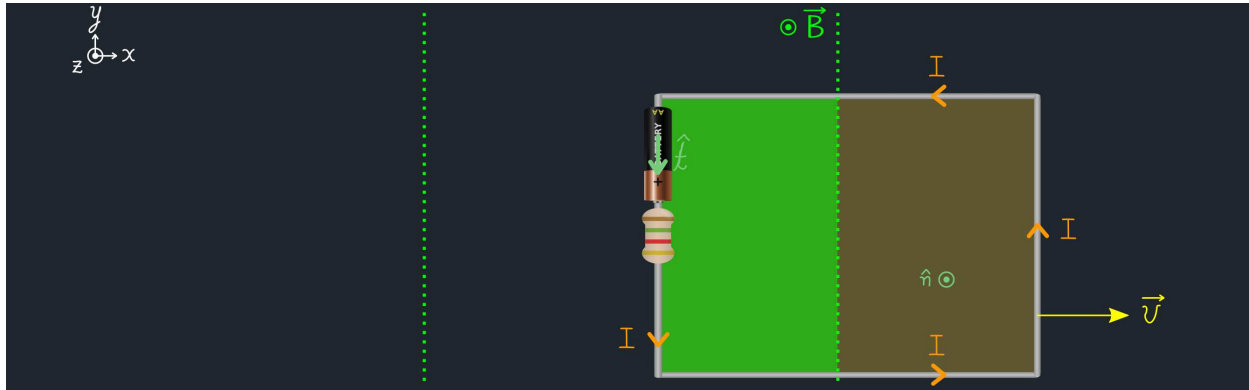
14



Opposition fem / variation flux magnétique dans un circuit en mouvement

15

La fem s'oppose aux variations du flux magnétique

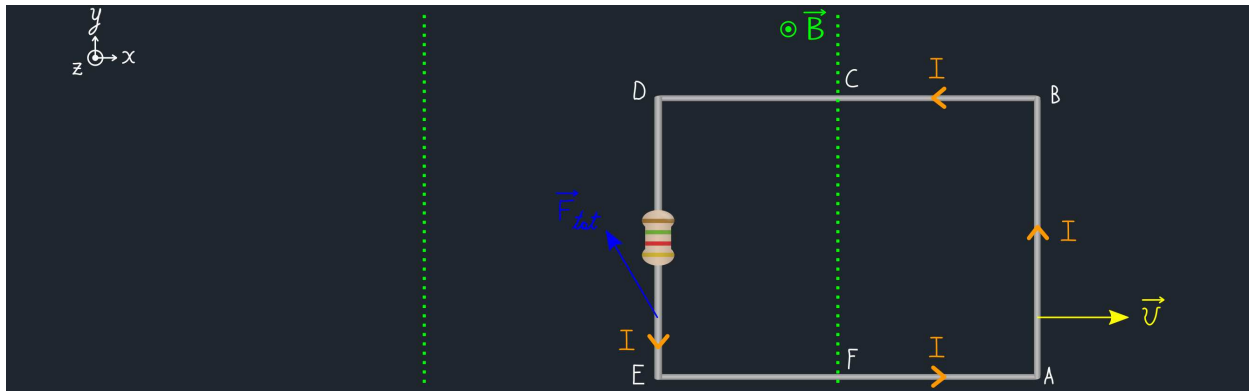


- ▼ En dehors du champ magnétique : pas de flux
- ▼ Phase d'entrée : fem crée courant I
 I crée champ magnétique secondaire \vec{B}' [boucle de courant]
 $\Phi_{B'} = \int_S \vec{B}'(\vec{r}) \cdot \hat{n} dS < 0$ $\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = Blx (> 0)$ ↗
- ▼ Entièrement dans le champ magnétique : Φ_B constant, pas de variations
- ▼ Phase de sortie : fem crée courant I
 I crée champ magnétique secondaire \vec{B}' [boucle de courant]
 $\Phi_{B'} = \int_S \vec{B}'(\vec{r}) \cdot \hat{n} dS > 0$ $\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = Bl(L - x) (> 0)$ ↘

16



La fem crée une force magnétique d'opposition



▼ Phase d'entrée

I sens horaire

Force magnétique sur AB :

sur un électron : $\vec{F}_m = |q_e|vB\hat{e}_y - |q_e|v_eB\hat{e}_x$ [fem circuit simple]

sur I : $\vec{F}_m \text{ sur courant} = I \int d\vec{l} \wedge \vec{B} = -IlB\hat{e}_x$ [force magnétique courant]

▼ Phase de sortie

I sens anti-horaire

Force magnétique sur DE :

sur un électron : $\vec{F}_m = |q_e|vB\hat{e}_y - |q_e|v_eB\hat{e}_x$ [fem circuit simple]

sur I : $\vec{F}_m \text{ sur courant} = I \int d\vec{l} \wedge \vec{B} = -IlB\hat{e}_x$ [force magnétique courant]

[loi Lenz]

17



Loi de Lenz

18

La loi de Lenz

- ▼ [fem mouvement flux magnétique] fem due au mouvement
- ▼ [loi Faraday intégrale] fem due à l'induction
- ▼ [loi flux magnétique] les deux phénomènes dans une équation

$$\text{fem} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- ▼ Quelle polarité pour la fem ?
- ▼ Loi de Lenz : le signe —
- ▼ Variations de $\Phi_B \longrightarrow \text{fem} \longrightarrow I$
 1. $I \longrightarrow \vec{B}' \longrightarrow \Phi_{B'}$ s'oppose *aux variations* de Φ_B
 2. $I \longrightarrow \vec{F}_m$ sur courant s'oppose *au mouvement* qui crée les variations de Φ_B
(p.ex. freinage) [opposition fem variation flux]
 - 2'. $I \longrightarrow \vec{F}_m$ sur courant *crée le mouvement* pour s'opposer aux variations de Φ_B (p.ex. lévitation)

19

