

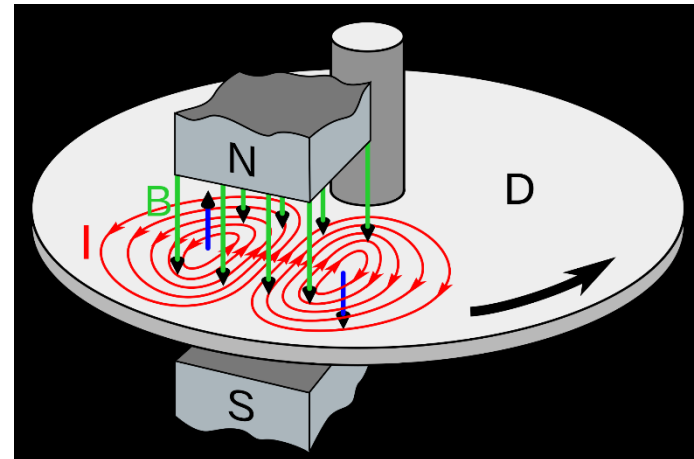


Éléments de Physique : Électromagnétisme

CHAPITRE 7 : INDUCTION

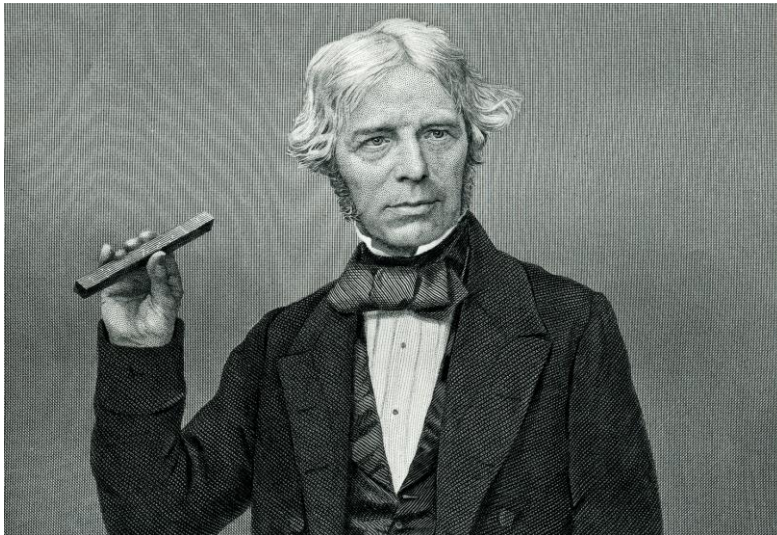
Table des matières

- Flux magnétique
- Loi de Faraday et loi de Lenz
- Induction

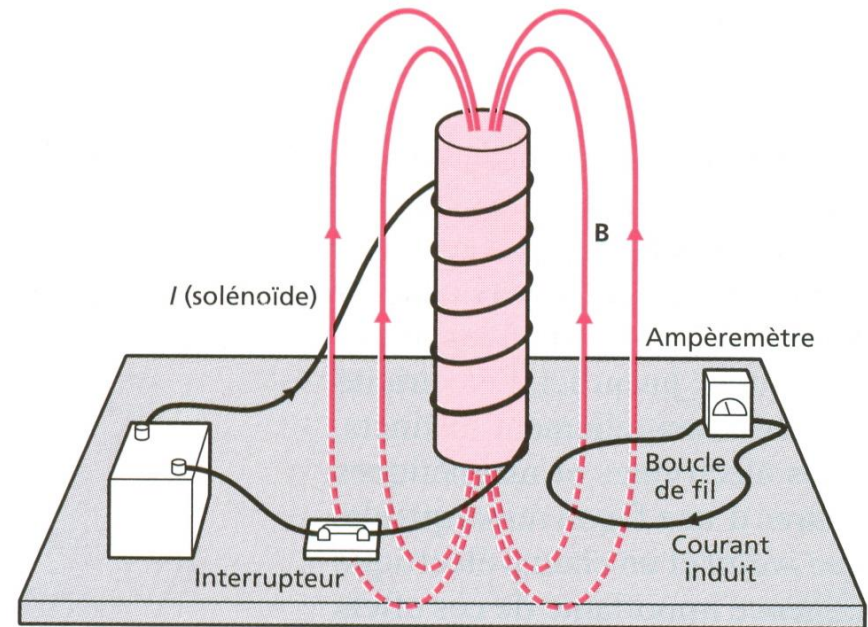


Introduction

Question posée par Faraday : Si le courant induit un champ magnétique, est-ce qu'un champ magnétique peut **induire un courant** ?



La réponse est oui, mais pas pour n'importe quel champ.



Flux magnétique

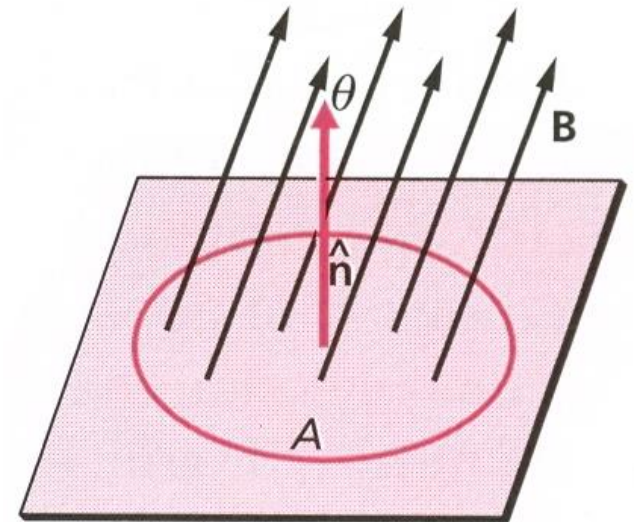
Quantité fondamentale de l'induction : le flux magnétique.

Le **flux magnétique** correspond à la quantité de lignes de champ magnétique qui traversent une surface, perpendiculairement à celle-ci.

Trois paramètres sont importants :

- l'intensité du champ \mathbf{B}
- la projection sur la normale $\hat{\mathbf{n}}$
- l'aire totale A

Analogie avec un fluide qui traverse un tuyau



Flux magnétique

Pour un champ magnétique B homogène, le flux magnétique ϕ s'écrit :

$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad \text{avec } \mathbf{A} = A\hat{\mathbf{n}}$$

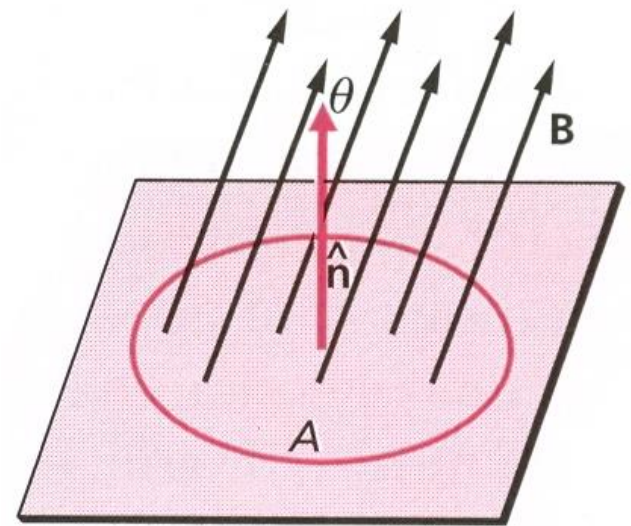
En règle générale (champ inhomogène) :

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Unité du flux magnétique : weber (Wb) = T.m²

Exemple de calcul :

- Surface de section A orientée par $\hat{\mathbf{n}}$
- Champ constant \mathbf{B} , à un angle θ par rapport à $\hat{\mathbf{n}}$
- Flux total : $\phi = BA \cos \theta$



Loi de Faraday

La force électromotrice totale ε induite dans un circuit est égale à la variation du flux magnétique par rapport au temps :

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

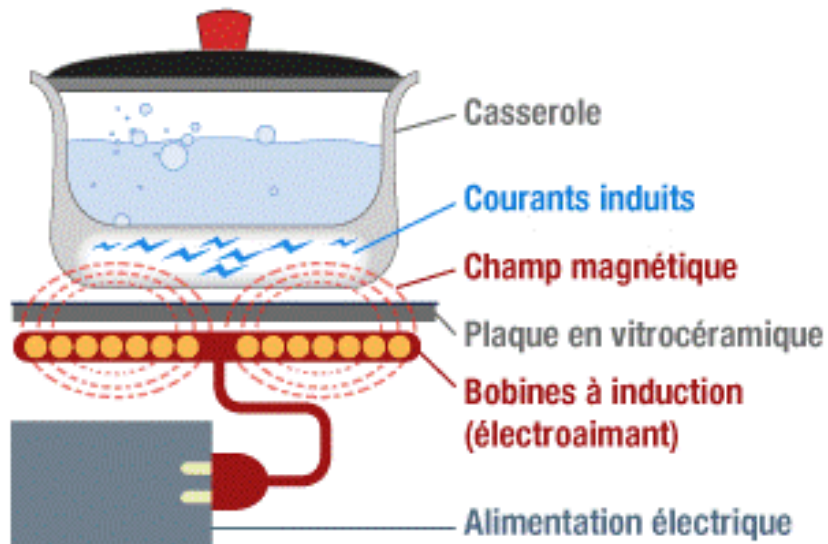
C'est la **loi de Faraday**.

Les variations de B , A ou de l'angle θ peuvent toutes avoir le même effet : ce qui compte, c'est la **variation du flux**.

L'apparition d'une FEM induite dans un circuit est à l'origine d'un **courant induit**.

Exemples d'applications

- Taques à induction
- Recharge sans fil

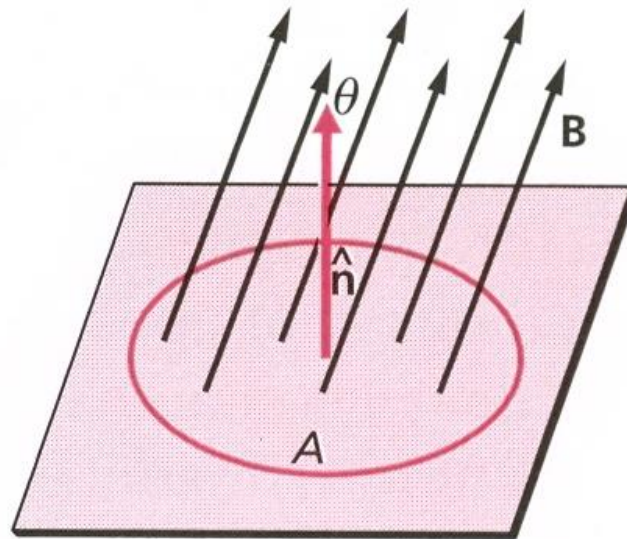


Dipôle magnétique induit

Conséquence de la loi de Faraday :

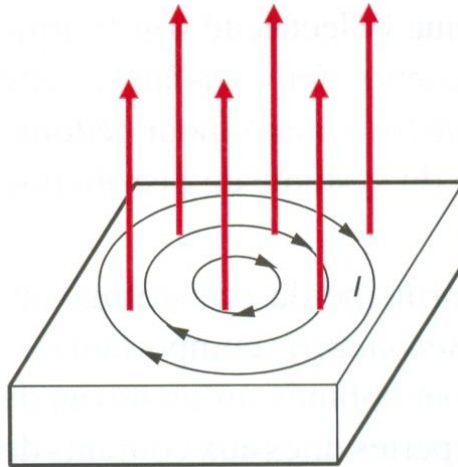
Le courant induit par la variation de ϕ crée à son tour un **champ induit** \mathbf{B}_{ind} . Ce champ est dans le sens opposé à la variation du flux magnétique.

$$\frac{d\phi}{dt} \rightarrow \varepsilon \rightarrow I_{\text{ind}} \rightarrow \mathbf{B}_{\text{ind}}$$



Loi de Lenz

Loi de Lenz : Une FEM induite produit un courant, dont le champ magnétique \mathbf{B}_{ind} s'oppose à la variation initiale du flux magnétique $\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$.



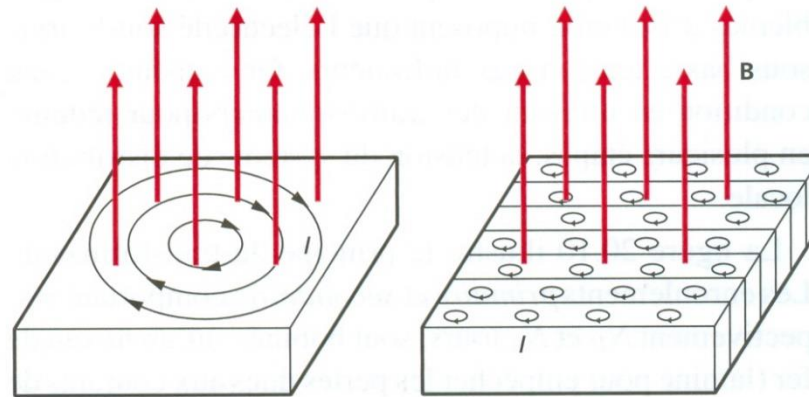
Exemples :

- Si le module du champ magnétique \mathbf{B} augmente, le dipôle induit \mathbf{B}_{ind} est dans le sens opposé à \mathbf{B} . L'effet est le même si A ou θ augmentent.
- Si le module du champ magnétique \mathbf{B} diminue, le dipôle induit \mathbf{B}_{ind} est dans le sens de \mathbf{B} . L'effet est le même si A ou θ diminuent.

Courants de Foucault

Les courants induits par une variation du flux existent même si on a un métal massif au lieu d'un circuit. Ce sont les **courants de Foucault**.

Ils dissipent de l'énergie, réduisent le rendement des moteurs, etc.

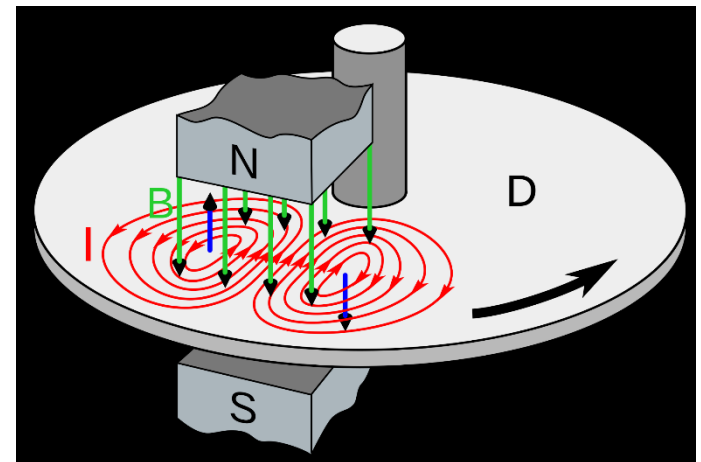
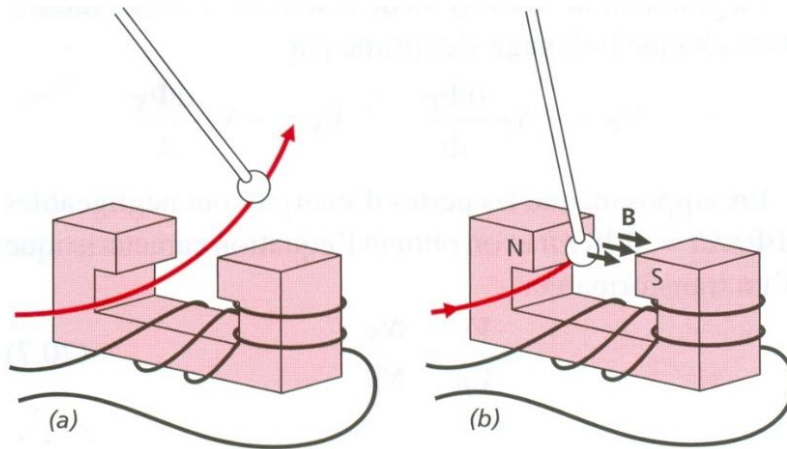


En intercalant des régions non métalliques, on réduit les courants de Foucault.

Courants de Foucault

Conséquences des courants de Foucault

A part la dissipation d'énergie, si on est en présence d'un champ magnétique, les courants induits sont à l'origine de forces de Laplace.



Ces forces vont s'opposer au mouvement d'un objet dans un champ B .

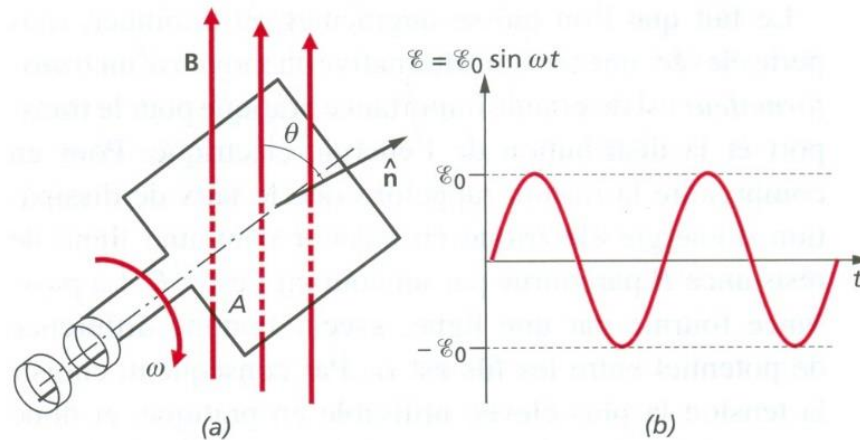
Ici, le pendule est freiné.

Applications : freins de camions, trains...

Générateurs électriques

L'effet d'induction exploité dans le fonctionnement d'un moteur électrique peut être utilisé pour générer du courant :

- soit on bouge un circuit dans un \mathbf{B} constant
- soit on bouge un aimant pour faire varier le flux



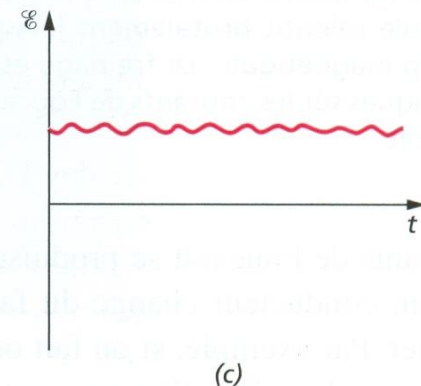
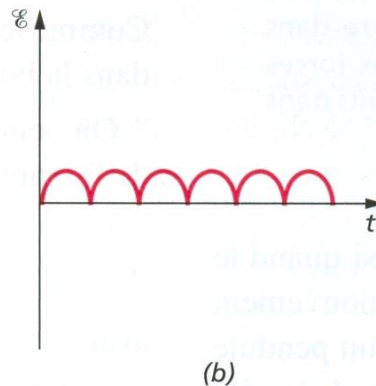
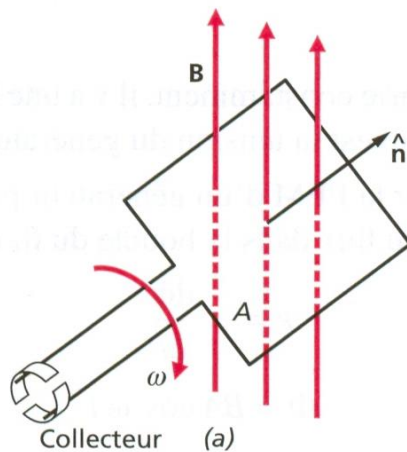
On obtient une tension alternative avec une pulsation ω et une amplitude \mathcal{E}_0 .

Pour une rotation à vitesse angulaire constante, la tension est sinusoïdale.

Générateurs électriques

Comment obtenir un courant continu ?

- utiliser un anneau collecteur fendu (a) pour redresser le courant (b)
- associer des circuits orientés avec des angles différents pour déphaser les tensions (c)



Self-induction

Conséquence de la Loi de Lenz :

Le courant induit dans un circuit s'oppose à la variation de courant initiale qui produit l'induction.

Circuit à l'équilibre :

$$I = \text{constante} \rightarrow B = \text{constante} \rightarrow \Delta\phi = 0$$

→ pas d'induction

Régime transitoire :

$$\Delta I \rightarrow \Delta B \rightarrow \Delta\phi \rightarrow \varepsilon \rightarrow \Delta\Delta I$$

→ self-induction

FEM \sim variation ΔI

(Biot-Savart + Faraday/Lenz)

$$\boxed{\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}}$$

Inductance L

Calcul de l'inductance L pour une bobine avec noyau de fer

- Le courant crée un champ magnétique B (amplifié d'un facteur K_m par le noyau de fer) :

$$B = K_m \mu_0 n I$$

- Le flux total s'écrit

$$\phi = NBA = n \ell B A$$

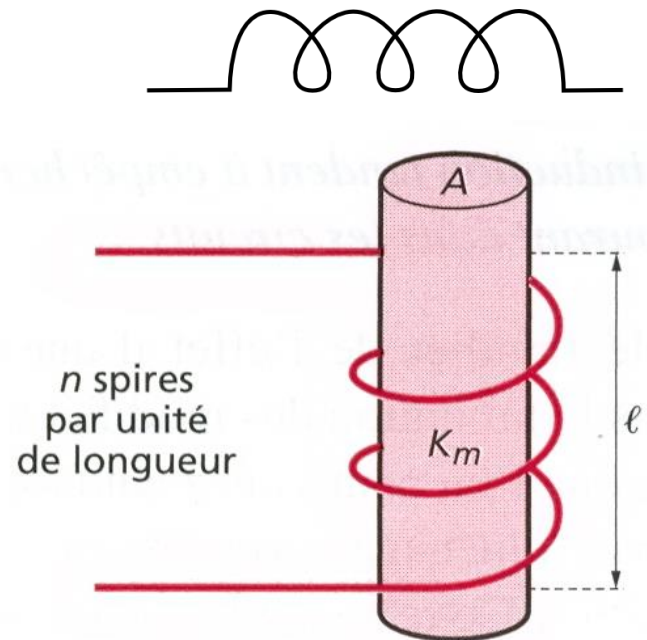
- On a $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ et $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$.

- En groupant ces deux relations, on a

$$L = K_m \mu_0 n^2 \ell A$$

Unités de L : henry (H)

Symbole électronique :



Energie d'une self

- Puissance instantanée : $P = I\varepsilon = LI \frac{dI}{dt}$
- Energie totale accumulée : $U_L = \int P dt = \frac{LI^2}{2}$

$$U_L = \frac{LI^2}{2}$$



Transformateur

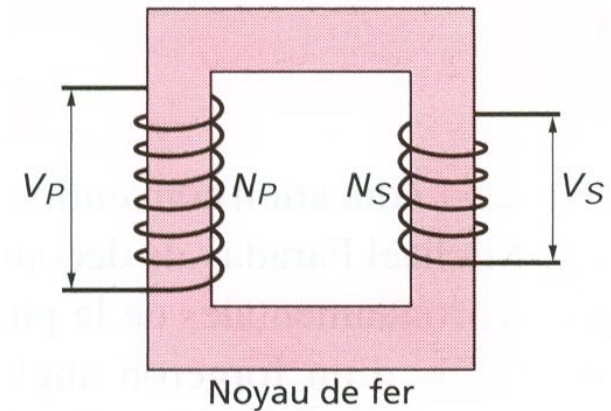
Un **transformateur** est une paire de solénoïdes reliés par un noyau aimantable (par exemple du fer) qui canalise le flux magnétique.

Un courant dans l'enroulement primaire (P) induit un flux et donc un courant dans l'enroulement secondaire (S).

Tensions aux bornes des solénoïdes :

$$V_S = -N_S \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_P = -N_P \frac{d\phi}{dt}$$



Relation entre primaire et secondaire :

$$\boxed{\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}}$$

Circuit RL

On place une résistance R et une inductance L en série.

➤ Lorsqu'on ferme le circuit ($t = 0$), $\frac{dI}{dt}$ est grand et l'inductance oppose une FEM. Une chute de potentiel a donc lieu en traversant L (comme pour R).

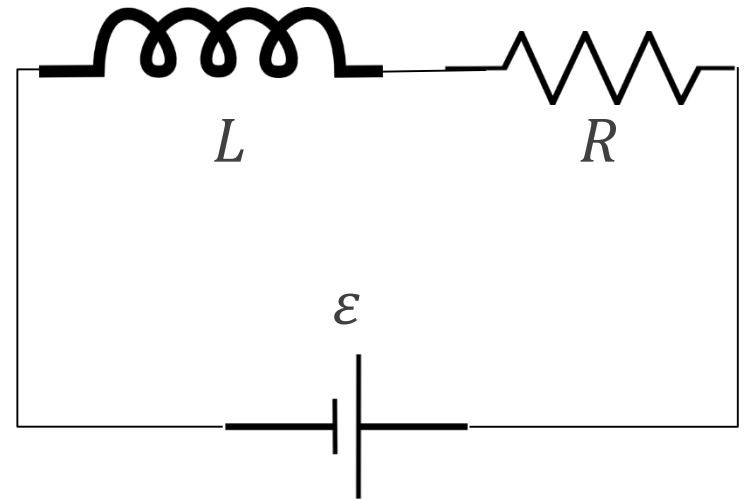
➤ En $t = +\infty$, $I = \frac{\varepsilon}{R}$ (courant constant).

➤ Equation d'évolution du circuit (Kirchhoff) :

$$\varepsilon - RI - L \frac{dI}{dt} = 0$$

Solution :
$$I = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right)$$

➤ Constante de temps du circuit : $\tau = \frac{L}{R}$



Circuit RL : autre exemple

État initial du circuit ($t = 0$)

➤ Lorsqu'on ferme l'interrupteur, l'inductance L a son action maximale et s'oppose complètement au passage du courant ($\Delta V_L = \varepsilon$).

➤ L agit comme un **coupe-circuit** : $I_2 = 0$.

➤ $I_1 = \varepsilon / R_1$

État final du circuit ($t = +\infty$)

➤ La variation de courant dans le circuit est nulle (état stationnaire) et L laisse passer le courant librement ($\Delta V_L = 0$).

➤ L agit comme un **court-circuit** : $I_2 = \varepsilon / R_2$.

➤ $I_1 = \varepsilon / R_1$

En t quelconque : $I_1 = \varepsilon / R_1$ $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{tR_2}{L}} \right)$

