

# Electromagnétisme

Préparation au R4.05 motorisations

# Sommaire

- Magnétostatique
  - Structure du champ magnétique théorème de Gauss
  - Création d'un champ magnétique: théorème d'Ampère
  - Matériau magnétique, aimantation
  - Force exercée par un champ magnétique ( Lorentz, Laplace )
- Champ magnétique variable :Induction électromagnétique
  - Loi de Lenz
  - Théorème de Faraday
- Applications
  - Transformateur
  - motorisation

# Structure du champ magnétique

- Le champ magnétique peut être générer par des courants électriques (si ce sont des aimants cela ne changera rien à l'étude)
- Ordre de grandeur du champ magnétique

Système	Terre	Aimant	Machine électrique	IRM
B (en Tesla)	$5 \cdot 10^{-5}$	0,1-1	Quelques Tesla	Jusqu'à 6 T

- Le champ magnétique est représenté par un champ de vecteur (comme la vitesse en mécanique des fluides)

# Structure du champ magnétique

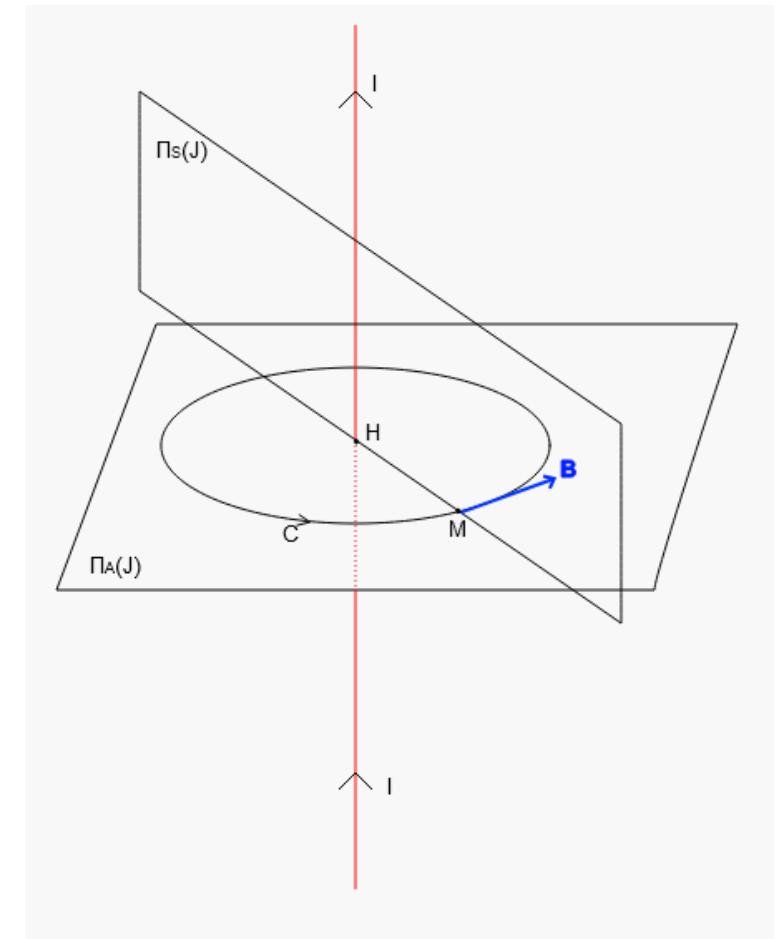
- **Invariance** : si le courant ne dépend pas d'une coordonnée, alors le champ magnétique aussi
- **Symétrie** : si la distribution de courant admet un plan de symétrie, le champ magnétique est orthogonal à ce plan de symétrie
- **Antisymétrie** : si la distribution de courant admet un plan d'antisymétrie, le champ magnétique appartient à ce plan
- **Théorème de Gauss**:  $\operatorname{div}(\vec{B}) = 0$  le flux du champ magnétique est conservatif  $\oint \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0$

# Théorème d'Ampère

- En régime permanent  $\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{B}) = \mu_0 \mu_r \vec{J}$
- En version intégrale  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r I$
- La circulation du champ magnétique sur un contour fermé est « proportionnelle » aux courants enlacés
- $\mu_0 4\pi \times 10^{-7}$  (T m/A)
- $\mu_r$  dépend du matériau

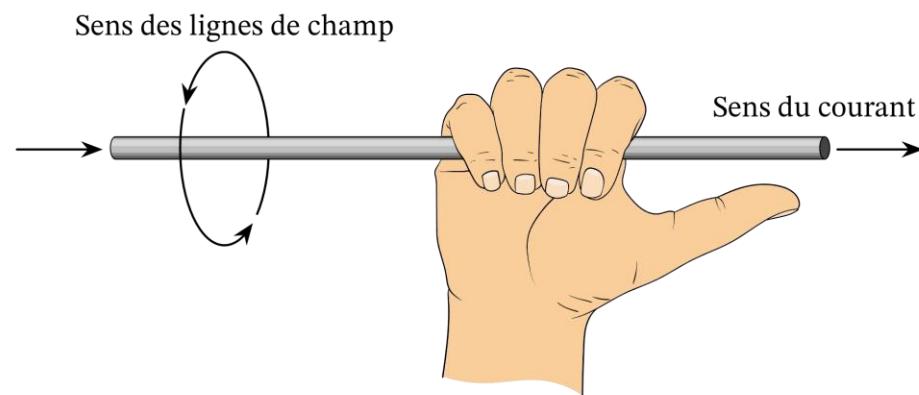
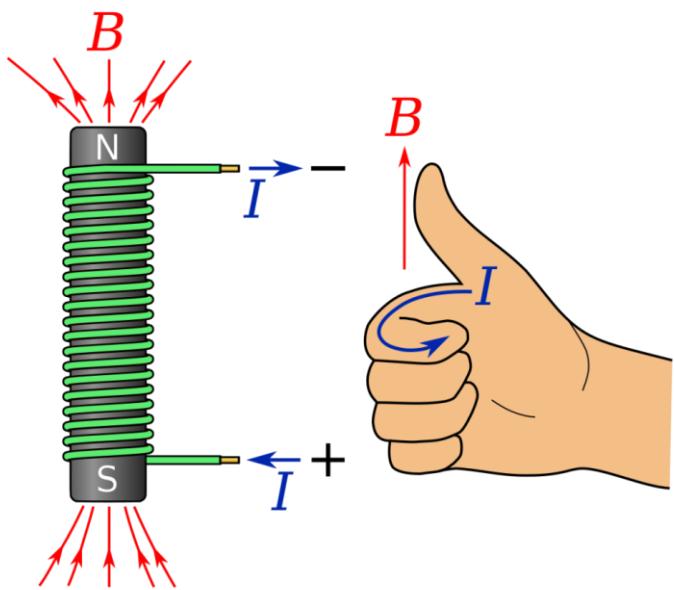
Perméabilité magnétique relative de matériaux ferromagnétiques à 20 °C

Matériaux ferromagnétiques	$\mu_r$ (valeur maximale)	Température de Curie en °C
Cobalt	250	1 130 <sup>1</sup>
Fer	5 000 <sup>2</sup>	770 <sup>1</sup>
Mu-métal	100 000 <sup>2</sup>	420
Nickel	600	358 <sup>1</sup>



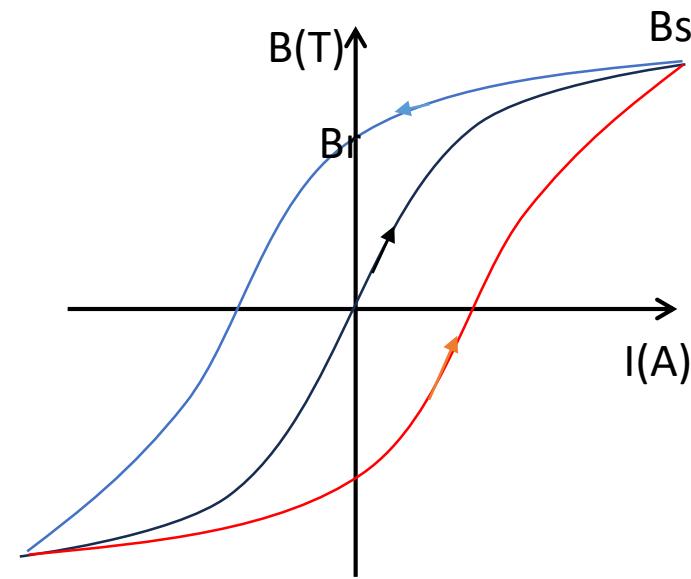
# Théorème d'Ampère

- Le champ magnétique « tourne » autour du courant
- Le courant « tourne » autour du champ magnétique



# Matériaux magnétiques

- Le champ magnétique est proportionnel au courant jusqu'à une certaine limite
- dépend de la géométrie du circuit magnétique
- Dans une application, on cherche à ce placer à la limite de la saturation
- $B_r$  est le champ magnétique rémanent

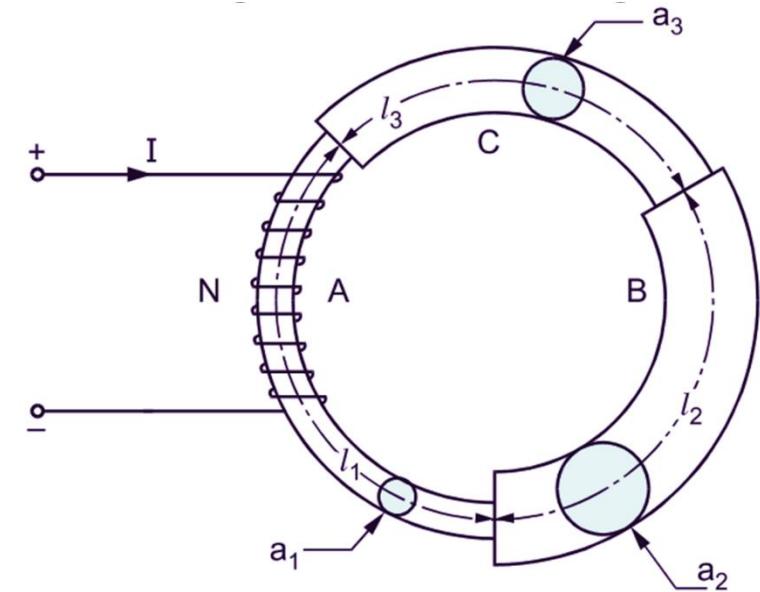


# Flux magnétique, inductance

- Le flux magnétique est égal au flux du champ magnétique à travers une surface.  $\Phi = \iint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS}$
- Dans un conducteur, comme le champ magnétique est proportionnel au courant  $\Phi = \iint_{\text{circuit}} \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} = LI$
- L est l'inductance du circuit électrique

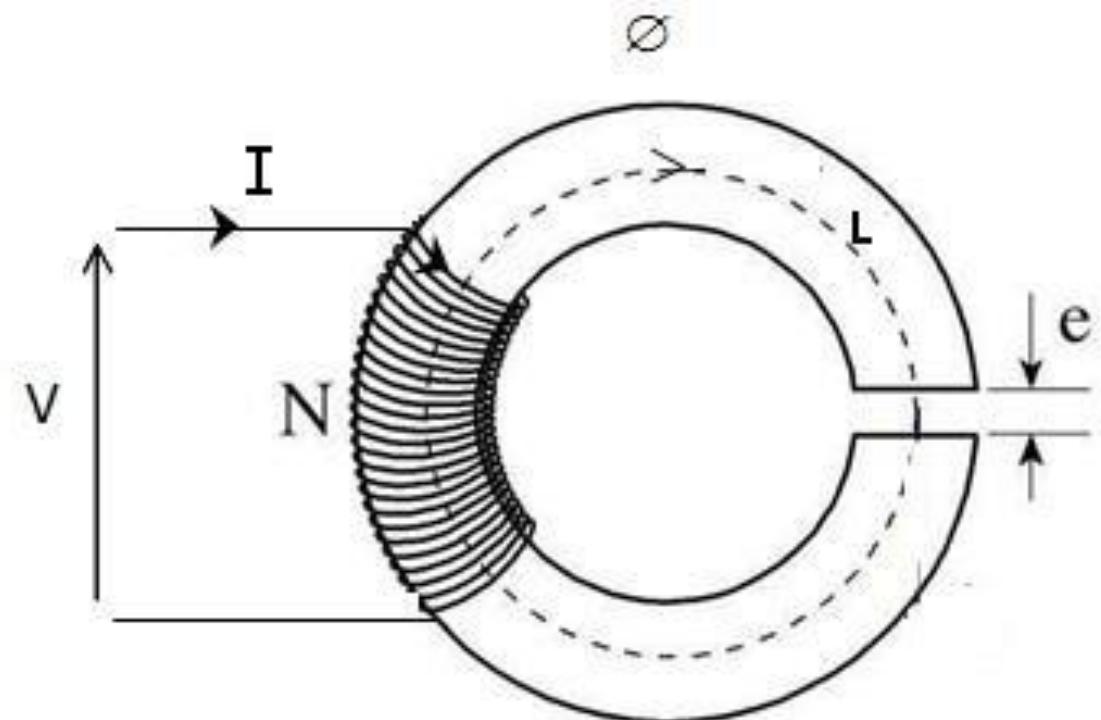
# Loi d'Hopkinson, Résistance

- Le théorème d'Ampère En version intégrale  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r N I =$
- et  $\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$
- Analogie avec la loi d'Ohm  $\mathcal{R}\Phi = NI$
- $\mathcal{R}$  est la résistance du circuit magnétique



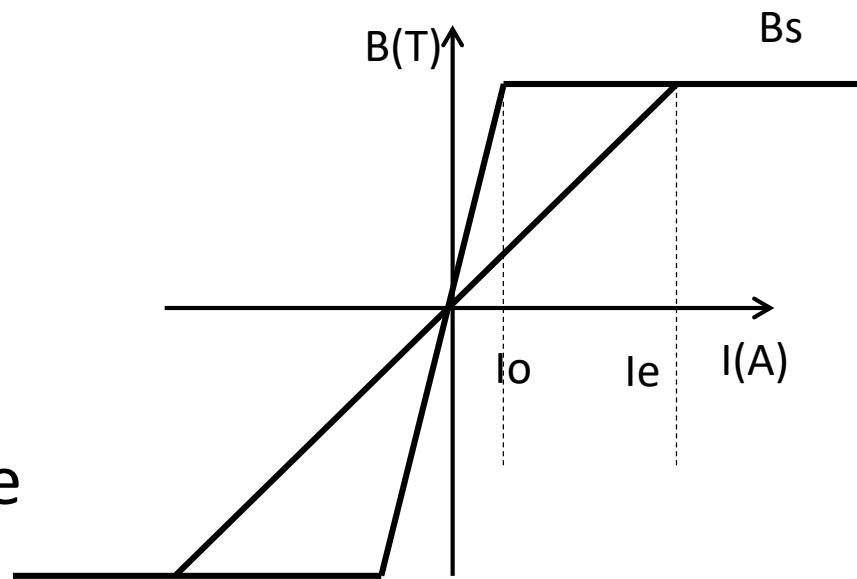
# Entrefer, variation d'inductance, de réluctance

- La présence d'un entrefer modifie les caractéristiques du circuit magnétique
- Conservation du flux magnétique
- $B_{air} = B_{fer} = B$
- $NI = e\mu_0 B + L\mu_0 \mu_r B$
- $B = \frac{NI}{e\mu_0 + L\mu_0 \mu_r}$
- $\Phi = NSB = \frac{N^2 S}{e\mu_0 + L\mu_0 \mu_r} I$
- quand  $e$  augmente  $L$  diminue
- $Em = \frac{1}{2} LI^2$



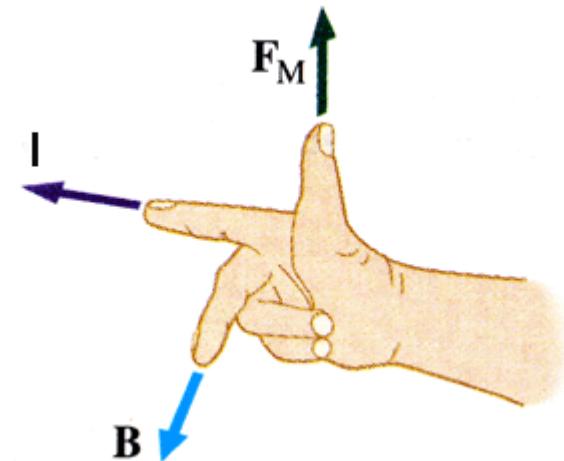
# Matériaux magnétiques influence de l'entrefer

- Le champ magnétique est proportionnel au courant jusqu'à une certaine limite
- Lorsque l'entrefer est plus important, la saturation intervient pour un courant plus important
- La présence d'entrefer permet le stockage d'une énergie magnétique plus importante



# Forces exercées par un champ magnétique

- Sur une particule chargée  $q$  de vitesse  $\vec{v}$ , La force de Lorentz a pour expression  $\vec{F}_{Lorentz} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$
- Dans un conducteur rectiligne, la force de Laplace est la réaction à la résultante de toute les forces de Lorentz qui s'appliquent sur les charges en mouvement.  $d\vec{F}_{Laplace} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$ 
  - I Index
  - B Majeur (Magnétique)
  - F Pouce ( la force pousse)



# Loi de Lenz, Théorème de Faraday

- Le courant induit a un sens tel que le flux induit qu'il crée s'oppose aux variations du flux inducteur.
- Lorsque le flux à travers un circuit électrique varie il apparait un champ électrique
- Une force électromotrice aux bornes du circuit ( tension induite)
- $\overrightarrow{rot}(\vec{B}) = - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  ( forme locale)
- $e = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = L \frac{\partial i}{\partial t}$  ( forme intégrale)
- Le flux varie car le champ magnétique varie ou parce que la géométrie du circuit varie

# Transformateur

- Un transformateur est constitué
  - Un circuit magnétique
  - Un circuit électrique primaire  $N_1$  spires
  - Un circuit électrique secondaire  $N_2$  spires
- Si l'on suppose un transformateur parfait
  - Tout le flux créé par le courant primaire passe à travers le circuit secondaire
  - $m = U_2/U_1 = N_2/N_1 = I_1/I_2$

