

# Magnétisme et Machines CC

Alejandro Ospina Vargas– Enseignant-Chercheur UTC

Université de Technologie de Compiègne

# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
    - Le champ magnétique : définitions
    - Courant électrique et champ magnétique
    - Loi d'Ampère
    - Conservation du flux
    - Loi de comportement
    - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continue
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

# Objectifs

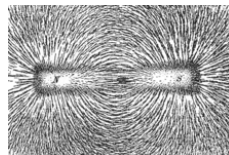
- Comprendre :
  - les principes physiques du magnétisme
  - la conversion d'énergie électromécanique

# Sommaire

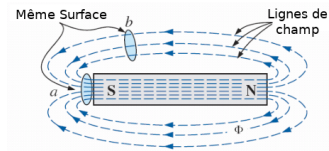
- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - **Le champ magnétique : définitions**
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continue
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

## Les lignes de champ

**Les lignes de force ou lignes de champ** : vont relier des points de l'espace avec la même magnitude de force (équipotentiels).

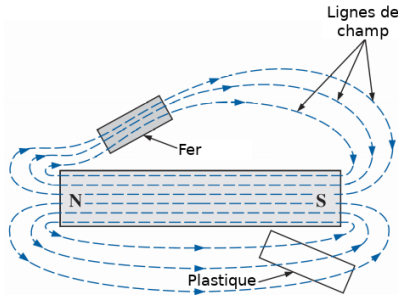


**L'intensité du champ magnétique  $H$**  : magnitude de la force sur une ligne de champ.  
**La densité de lignes de champ  $B$**  : nombre de lignes par unité de surface.



## Les lignes de champ

Certains matériaux peuvent resserrer les lignes de champ (augmentation de la densité magnétique  $\mathbf{B}$ ) : *canalisation* des lignes de champ de champ.

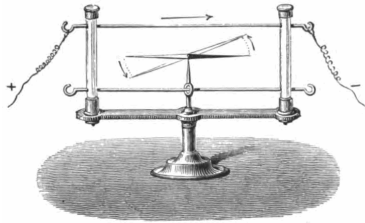


# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - **Courant électrique et champ magnétique**
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continue
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

# L'expérience d'Oersted

Interaction courants - aimants, matériaux magnétiques

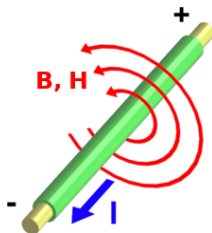


Le champ (magnétique) de forces créé par un courant électrique et de la même nature que celui généré par la terre (boussole) ou par un aimant.



## Courant électrique et champ magnétique

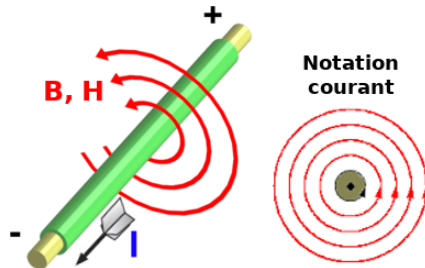
Création d'un champ magnétique autour d'un fil grâce à la circulation du courant



L'intensité du champ magnétique  $H$  décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du conducteur.

## Courant électrique et champ magnétique

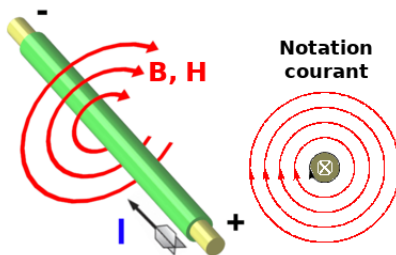
Direction du champ magnétique et sens du circulation du courant :



Règle de la main droite : le pouce de la main droite indique la circulation du courant (flèche) et les autres doigts indiquent le sens de rotation des lignes de champ.

## Courant électrique et champ magnétique

Direction du champ magnétique et sens du circulation du courant :



Règle de la main droite : le pouce de la main droite indique la circulation du courant (flèche) et les autres doigts indiquent le sens de rotation des lignes de champ.

# Sommaire

## 1 Magnétisme

- Objectifs
- Le champ magnétique : définitions
- Courant électrique et champ magnétique
- **Loi d'Ampère**
- Conservation du flux
- Loi de comportement
- Forces d'origine magnétique

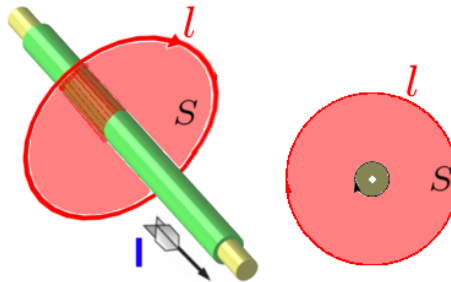
## 2 Machine à courant continue

- Principe de fonctionnement
- Fonctionnement : Aimants Permanents
- Fonctionnement : Excitation Séparée
- Fonctionnement : autres types d'excitation
  - Fonctionnement : série
  - Fonctionnement : dérivation

## Loi d'Ampère

La projection du vecteur  $\mathbf{H}$  le long d'un parcours fermé  $l$  est égale aux courants qui traversent la surface  $S$  délimité par le parcours :

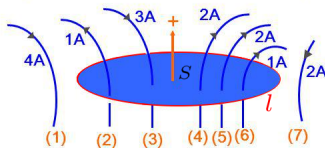
$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_S I$$



## Loi d'Ampère

La projection du vecteur  $\mathbf{H}$  le long d'un parcours fermé  $l$  est égale aux courants qui traversent la surface  $S$  délimité par le parcours :

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_S I$$



$$I_{(2)} + I_{(3)} + I_{(4)} + I_{(5)} + I_{(6)}$$

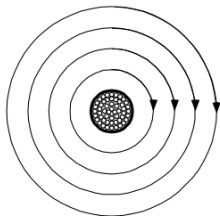
↓	↓	↓	↓	↓
+1	-3	+2	+2	+1

3A

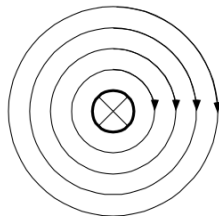
## Loi d'Ampère

Le champ magnétique créé par plusieurs conducteurs est égal au champ créé par un seul conducteur si le produit  $N I$  est égal ( $N$  étant le nombre de conducteurs et  $I$  le courant).

$$I = 5 \text{ A}, N = 100$$



$$I = 500 \text{ A}, N = 1$$



L'intensité du champ magnétique  $\mathbf{H}$  s'exprime en  $\frac{\text{Ampères}}{\text{m}}$ .

# Sommaire

## 1 Magnétisme

- Objectifs
- Le champ magnétique : définitions
- Courant électrique et champ magnétique
- Loi d'Ampère
- **Conservation du flux**
- Loi de comportement
- Forces d'origine magnétique

## 2 Machine à courant continue

- Principe de fonctionnement
- Fonctionnement : Aimants Permanents
- Fonctionnement : Excitation Séparée
- Fonctionnement : autres types d'excitation
  - Fonctionnement : série
  - Fonctionnement : dérivation

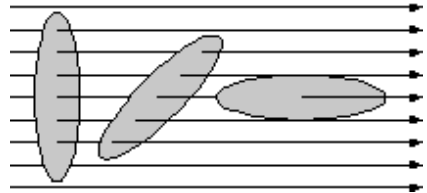


## Conservation du flux

Le **flux magnétique**  $\Phi$ , à travers une surface, est l'ensemble des lignes de force, qui traversent cette surface.

Ce flux est d'autant plus grand que :

- la surface est grande ;
- les lignes de force sont serrées ;
- l'orientation de la surface est perpendiculaire aux lignes de force.



Flux magnétique  $\Phi$  s'exprime en Webers (Wb).

## Conservation du flux

Le flux magnétique va se calculer avec la **densité de flux  $\mathbf{B}$**  comme suit,

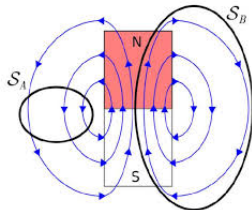
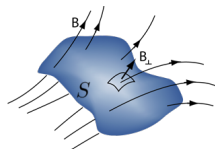
$$\mathbf{B}_{\perp} S = \Phi$$

Densité de flux  $\mathbf{B}$  en

$$\frac{\text{Webers}}{\text{m}^2} = \text{Teslas.}$$

Pour une surface fermée (voir  $S_A$ ,  $S_B$ ) le flux magnétique total est nul : même quantité de lignes qui rentrent et qui sortent :

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{\text{entrant}} + \Phi_{\text{sortant}}$$



# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - **Loi de comportement**
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continue
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

## Loi du comportement

Relation entre l'intensité du champ magnétique  $\mathbf{H}$  et la densité magnétique  $\mathbf{B}$  dans un matériau,

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

avec  $\mu$  la **perméabilité magnétique** du matériau.  
Dans le vide,

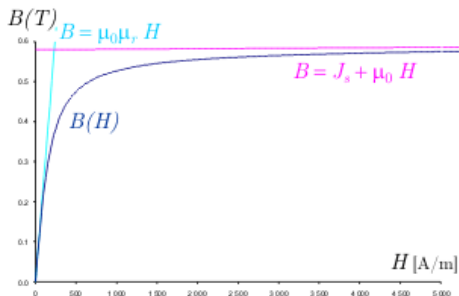
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \text{ (Henry par mètre)}$$

pour les autres matériaux, il faut une perméabilité relative  $\mu_r$  (par rapport au vide) :

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

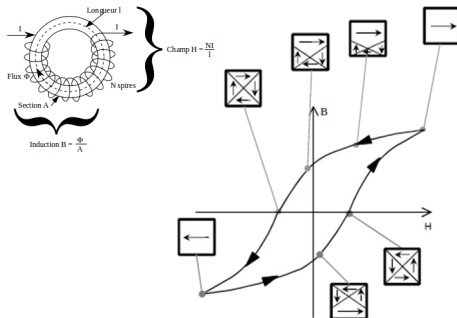
## Loi de comportement

La perméabilité relative n'est pas une constante  $\Rightarrow$  comportement non-linéaire.



## Loi de comportement

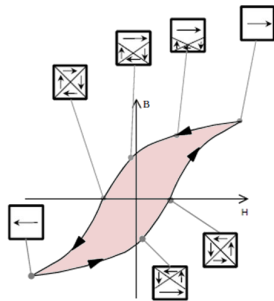
La perméabilité d'un matériau peut bifurquer!!! :



Un matériau magnétique = une multitude des « aimants élémentaires ».

## Loi de comportement

La réponse magnétique d'un matériau dépend de la « facilité » à aligner les aimants élémentaires (les domaines magnétiques).

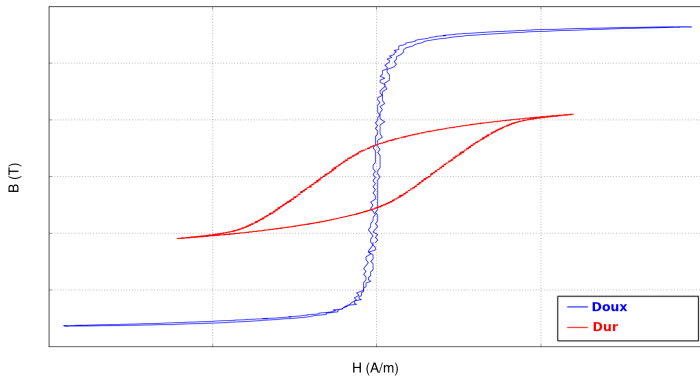


*Les pertes par hystérésis* : La rotation des domaines consomme de l'énergie. Pertes proportionnelles à la surface du cycle.

$$\begin{aligned}
 BH &= [\text{T}][\text{A/m}] = [\text{Wb/m}^2][\text{A/m}] = [\text{V}][\text{s}][\text{A}]/[\text{m}^3] \\
 &= [\text{W}][\text{s}]/[\text{m}^3] = [\text{J}]/[\text{m}^3]
 \end{aligned}$$

# Loi de comportement

Deux types des matériaux selon la « facilité » d'aimantation (alignement des domaines magnétiques) :





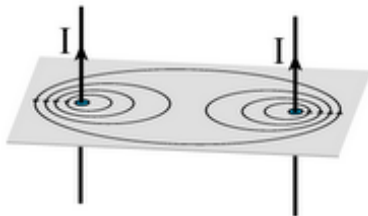
# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continue
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

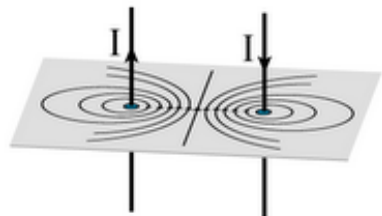
## Forces d'origine magnétique

Deux conducteurs proches, parcourus par des courants...

Même direction :



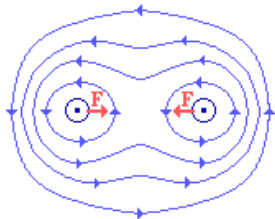
Directions opposées :



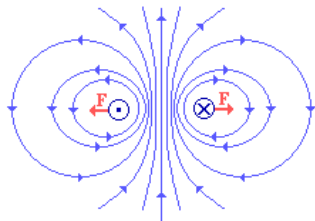
## Forces d'origine magnétique

Deux conducteurs proches, parcourus par des courants  $\Rightarrow$  des forces s'appliquent sur eux :

Même direction :

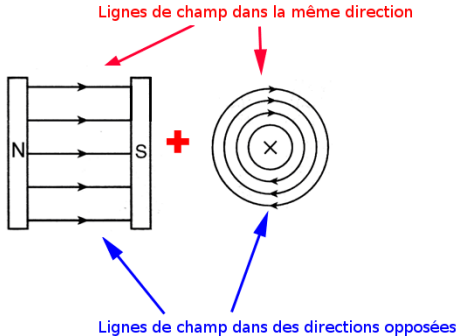


Directions opposées :



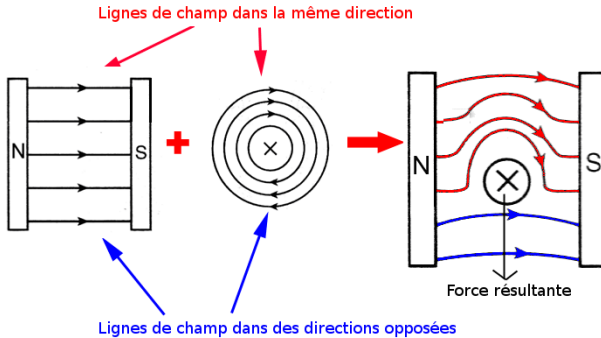
## Forces d'origine magnétique

Si nous plaçons un conducteur dans un champ magnétique (p.e. un aimant permanent) :



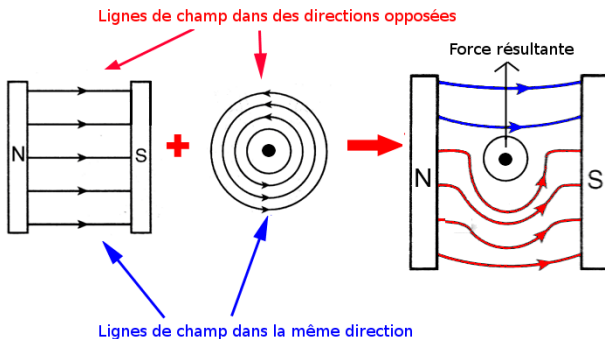
## Forces d'origine magnétique

Si nous plaçons un conducteur dans un champ magnétique (p.e. un aimant permanent) : nous constatons que le conducteur est soumis à une force perpendiculaire, à la fois au champ et au courant.



## Forces d'origine magnétique

Si l'on inverse le courant, on inverse le sens de la force.



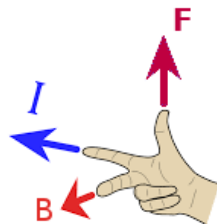
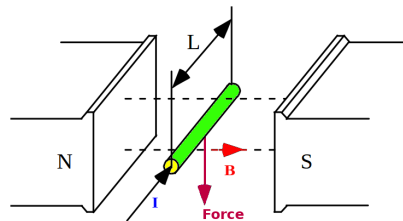
Les lignes de force (de champ)  $\equiv$  fils élastiques.

## Forces d'origine magnétique

L'intensité de la force dépend :

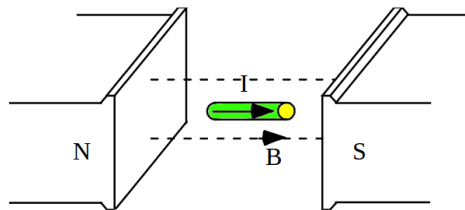
- de l'intensité du courant  $I$ ,
- de la longueur du conducteur soumise à l'induction  $L$ ,
- de la densité de flux magnétique (l'induction)  $B$ ,
- de l'orientation du conducteur dans le champ (angle  $\theta$ ).

$$F = ILB \sin \theta$$



## Forces d'origine magnétique

Si le conducteur est parallèle au champ magnétique ( $\theta = 0$ ), la force est nulle.



$$F = ILB \sin \theta$$

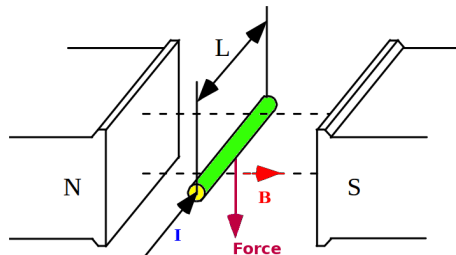


# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continu
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

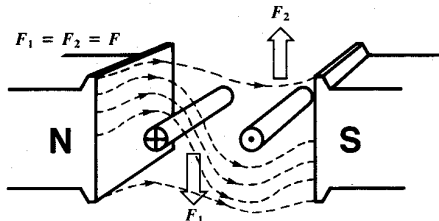
Rappel : force produite par un conducteur "plongé" dans un champ magnétique :



$$F = ILB \sin \theta$$

## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

L'action du champ sur le courant crée des forces  $F_1$  et  $F_2$  en sens opposé  $\Rightarrow$  couple  $C$  autour de l'axe de rotation.



$$C = F_1 \frac{d}{2} + F_2 \frac{d}{2} = Fd$$

Si  $N$  spires,

$$C = NFd$$

De la définition de force :

$$C = NILBd$$

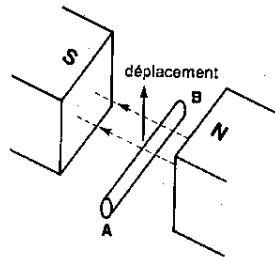
et comme la surface  $S = Ld$  et que  $\Phi = BS$ ,

$$C = K\Phi I$$

Le couple est proportionnel au courant, qui circule dans le cadre, et au flux imposé dans l'entrefer.

## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

Conducteur qui se déplace dans un champ magnétique : apparition d'une tension induite  $E$ .



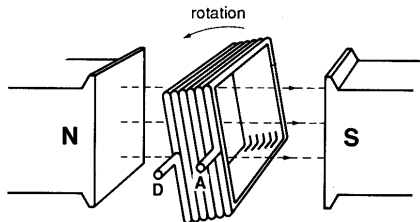
$$E = BLv$$

et comme  $B = \Phi/S$ ,

$$E = \frac{\Phi}{S}Lv$$

## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

En utilisant des spires :



$$E = 2N \frac{\Phi}{S} Lv$$

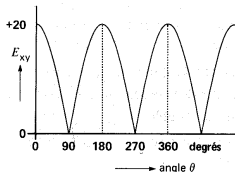
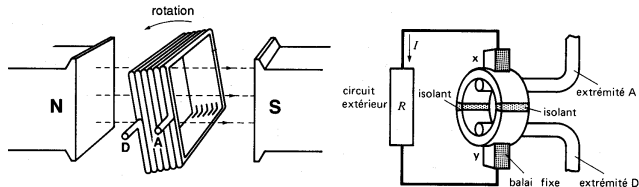
et comme  $S = 2rL$  et que  $v = r\Omega$ ,

$$E = 2N \frac{\Phi}{2rL} Lr\Omega = K\Phi\Omega$$

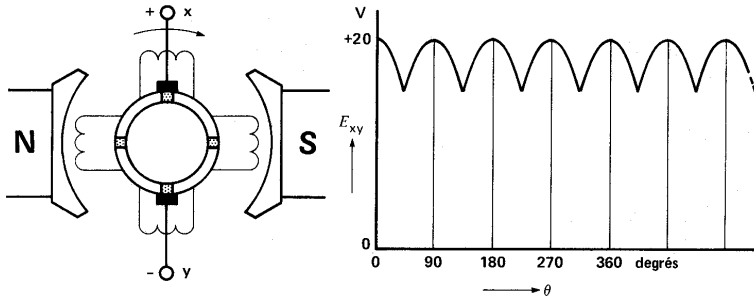
Tension  $E$  proportionnelle à la vitesse de déplacement et au flux imposé dans l'entrefer.

## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

Modifier les connexions à chaque demi-tour à l'aide d'un collecteur :  
tension toujours positive (courant continu)



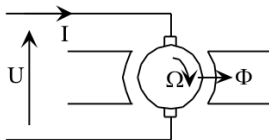
**Machine à courant continu : principe de fonctionnement**  
Augmentation du nombre de lames au collecteur et du nombre de bobines : lissage du signal de sortie  $\Rightarrow$  un meilleur courant continu.



## Machine à courant continu : principe de fonctionnement

$$E = K \Phi \Omega$$

$$C = K \Phi I$$



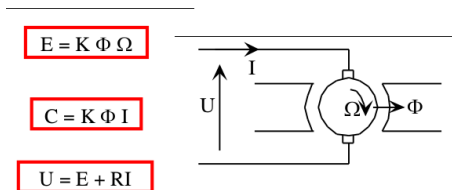
Les conducteurs, qui constituent le bobinage du rotor, ont une certaine résistance, et la circulation du courant  $I$  provoque, dans cette résistance, une chute de tension.

La tension extérieure  $U$  vaut la somme de la tension induite  $E$  (force électromotrice f.e.m.) et de la chute de tension  $RI$  :

$$U = E + RI$$



## Machine à courant continu : principe de fonctionnement



En première approximation, on peut négliger l'influence de  $R$  et supposer que  $U = E$

La puissance mécanique sera :

$$P_m = C\Omega = K\Phi I\Omega = K\Phi I \frac{E}{K\Phi} = IE = P_{elec}$$

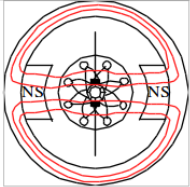
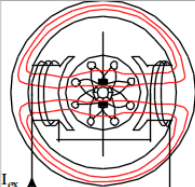
Le rendement  $\eta$  est donc égal à 1... pas de pertes, pas de chaleur produite.

# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
  
- 2 Machine à courant continu
  - Principe de fonctionnement
  - **Fonctionnement : Aimants Permanents**
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

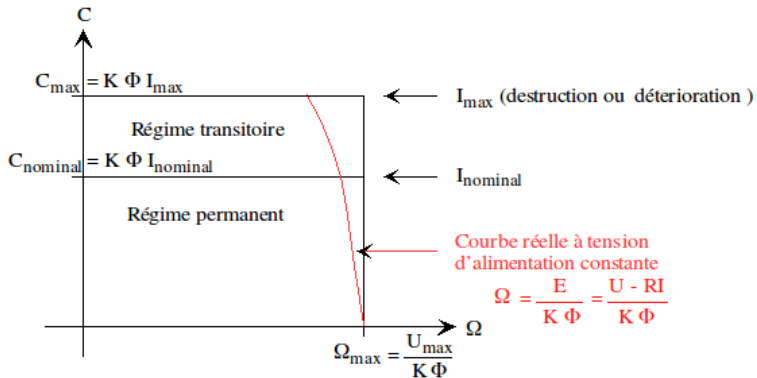
## Machine à courant continu : Aimants Permanents

Caractéristiques de fonctionnement de la machine : dépendent du courant  $I$ , la tension  $U$ , et le flux dans l'entrefer  $\Phi$ .

		
	Le champ est imposé par les aimants et est invariable	Le champ est imposé par le courant $I_{ex}$ et varie avec celui-ci
Avantage	Pas de source externe	Champ variable (réglable)
Inconvénient	Champ constant	Source externe

La caractéristique  $C = f(\Omega)$  dépend du champ  $\Rightarrow$  type de machine.

## Machine à courant continu : Aimants Permanents

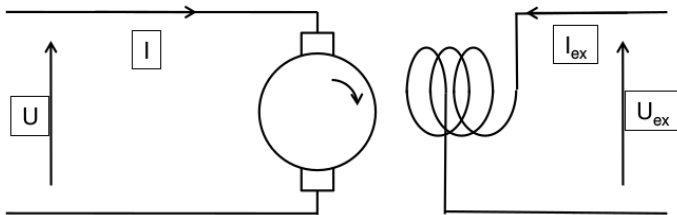


# Sommaire

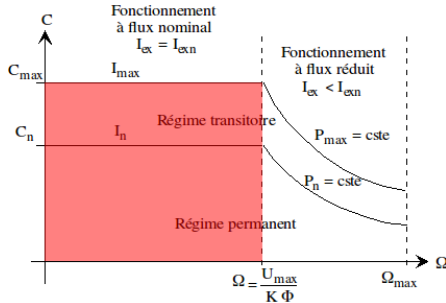
- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continu
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - **Fonctionnement : Excitation Séparée**
  - Fonctionnement : autres types d'excitation
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Aimants remplacés par des bobinages alimentés par un courant dit "d'excitation"  $\Rightarrow$  deux sources d'alimentation : courant rotor  $I$ , courant stator (excitation)  $I_{ex}$ .



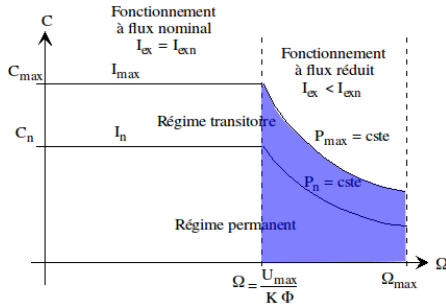
## Machine à courant continu : Excitation Séparée



L'espace de fonctionnement a une **région identique au moteur à aimants permanents** : champ réglé à sa valeur maximale.

## Machine à courant continu : Excitation Séparée

Si  $U = U_{max}$ , il est possible d'augmenter la vitesse, en diminuant le champ :  $\Omega = \frac{U_{max}}{K\Phi}$ ,



Si  $\Phi$  diminue, le couple aussi,  $C_{max} = K\Phi I_{max}$ , la limite est fixé par la puissance maximale  $P_{max} = C_{max}\Omega = U_{max}I_{max}$ . L'espace de fonctionnement est délimité par la courbe à puissance maximale.



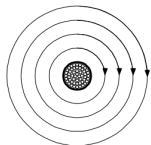
# Sommaire

- 1 Magnétisme
  - Objectifs
  - Le champ magnétique : définitions
  - Courant électrique et champ magnétique
  - Loi d'Ampère
  - Conservation du flux
  - Loi de comportement
  - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continu
  - Principe de fonctionnement
  - Fonctionnement : Aimants Permanents
  - Fonctionnement : Excitation Séparée
  - **Fonctionnement : autres types d'excitation**
    - Fonctionnement : série
    - Fonctionnement : dérivation

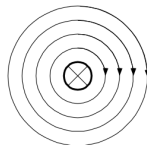
## Machine à courant continu : autres types d'excitation

**Rappel** : le champ magnétique créé par plusieurs conducteurs est égal au champ créé par un seul conducteur si le produit  $N I$  est égal ( $N$  étant le nombre de conducteurs et  $I$  le courant).

$$I = 5, N = 100$$



$$I = 500, N = 1$$

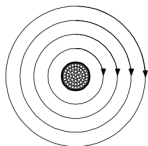


La résistance électrique est définie comme :

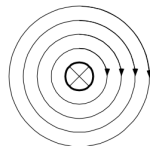
$$R = \frac{l}{\rho S}$$

avec  $l$  la longueur du conducteur,  $\sigma$  la conductivité électrique du matériau et  $S$  la section du conducteur.

## Machine à courant continu : autres types d'excitation



enroulement d'excitation fil fin :  
 $S$  petite,  $l$  grande  $\Rightarrow R_{ex}$  grande.



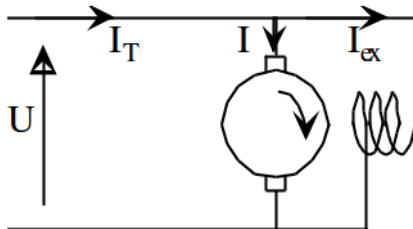
enroulement d'excitation fil gros :  
 $S$  grande,  $l$  petite  $\Rightarrow R_{ex}$  petite.

Pour une même tension d'excitation  $U_{ex}$  :  
enroulement d'excitation fil fin :  
 $\Rightarrow I_{ex}$  petite.

enroulement d'excitation fil gros :  
 $\Rightarrow I_{ex}$  grande.

## Machine à courant continu : autres types d'excitation

En général  $U_{ex}$  est de l'ordre de la tension nominale du rotor  $U$  : ce qui permet d'utiliser une seule source : **Moteur à excitation dérivation**

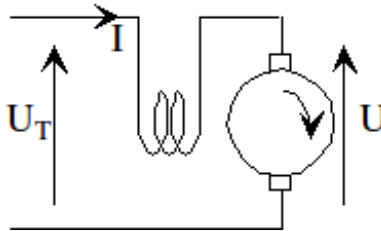


Quelle solution pour le bobinage dérivation :  $N$  élevé ou faible ?  
A cause de pertes Joule...

## Machine à courant continu : autres types d'excitation

Le bobinage d'excitation peut aussi être placé en série avec le rotor :

**Moteur à excitation série**

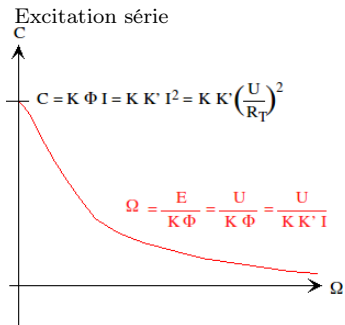
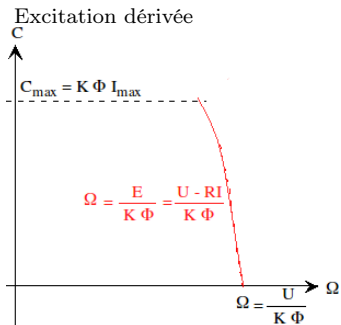


Quelle solution pour le bobinage série :  $N$  élevé ou faible ?

A cause de pertes Joule...

## Machine à courant continu : autres types d'excitation

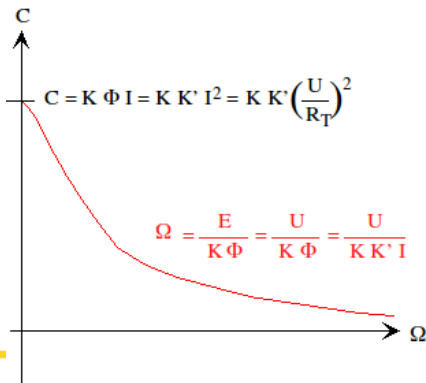
Les caractéristiques naturelles (à tension d'alimentation constante) de ces 2 moteurs sont très différentes.



## Machine à courant continu : autres types d'excitation

### Excitation série

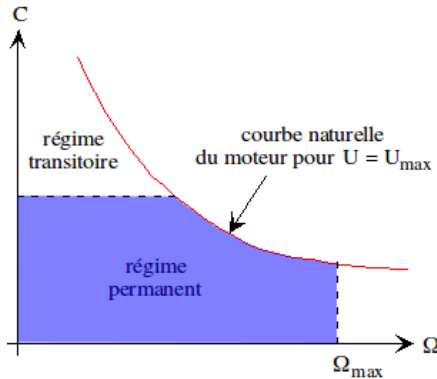
Le moteur série est presque exclusivement réservé aux **applications de traction**, grâce à son **fort couple de démarrage ( $\rightarrow I^2$ )**. Afin d'éviter le phénomène d'emballement le moteur doit toujours être accouplé à la charge (p.e. les roues).



## Machine à courant continu : autres types d'excitation

### Excitation série

Le domaine de fonctionnement, à tension d'alimentation variable du moteur série, est limité par une **vitesse maximale**.

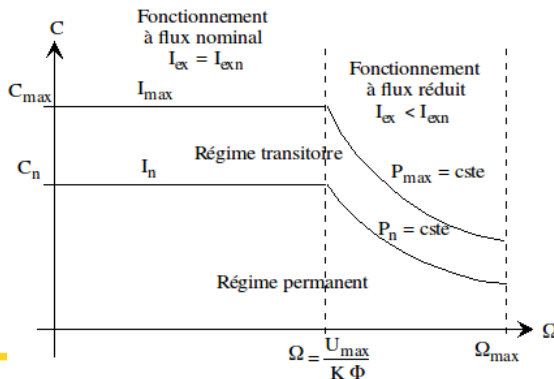




## Machine à courant continu : autres types d'excitation

### Excitation dérivation

Le domaine de fonctionnement du moteur dérivation comporte un espace identique au moteur à excitation séparée. La variation du courant d'excitation peut-être effectué par l'insertion d'une résistance en série avec le bobinage d'excitation.



## Machine à courant continu : exemples



## Machine à courant continu : exemples

