

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 continu

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

Objectifs

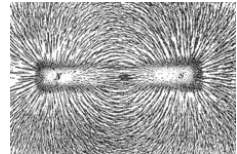
- Comprendre :
 - les principes physiques du magnétisme
 - la conversion d'énergie électromécanique

Sommaire

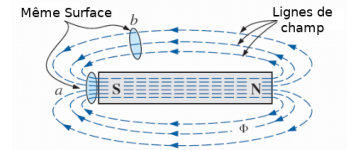
- 1 Magnétisme
 - Objectifs
 - Le champ magnétique : définitions
 - Courant électrique et champ magnétique
 - Loi d'Ampère
 - Conservation du flux
 - Loi de comportement
 - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continu
 - Principe de fonctionnement
 - Fonctionnement : Aimants Permanents
 - 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).

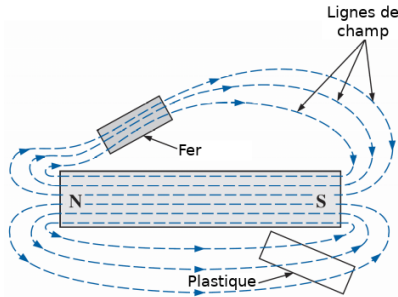


L'intensité du champ magnétique H : magnitude de la force sur une ligne de champ.
La densité de lignes de champ B : nombre de lignes par unité de surface.



Les lignes de champ

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



Sommaire

1 Magnétisme

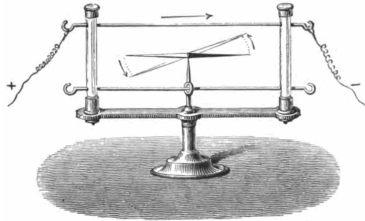
- Objectifs
- Le champ magnétique : définitions
- Courant électrique et champ magnétique
- Loi d'Ampère
- Conservation du flux
- Loi de comportement
- Forces d'origine magnétique

2 Machine à courant continu

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

L'expérience d'Oersted

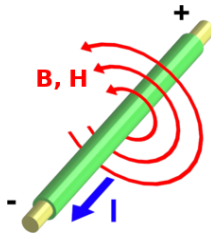
Interaction courants - aimants, matériaux magnétiques



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

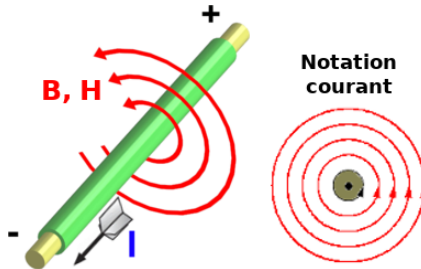
Création d'un champ magnétique autour d'un fil grâce à la circulation du courant



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

Courant électrique et champ magnétique

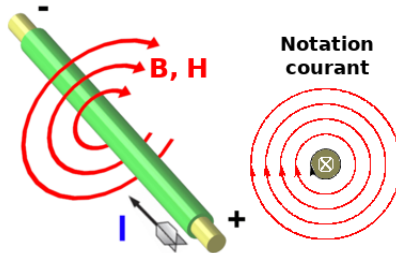
Direction du champ magnétique et sens de circulation du courant :



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 de 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

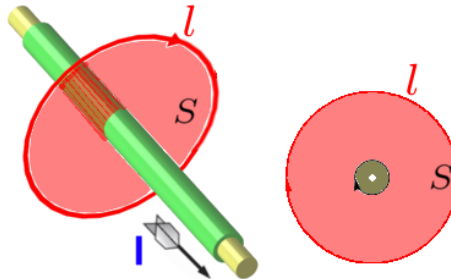
2 Machine à courant continue

- 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 :

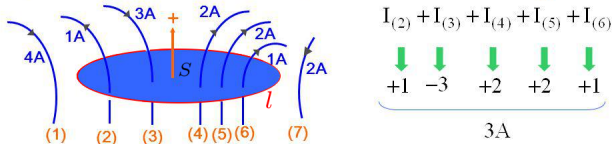
$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_S I$$



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 :

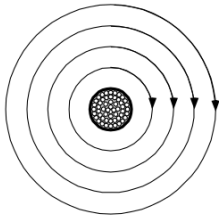
$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_S I$$



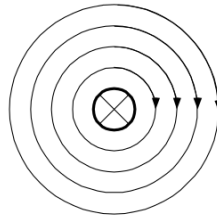
Loi d'Ampère

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

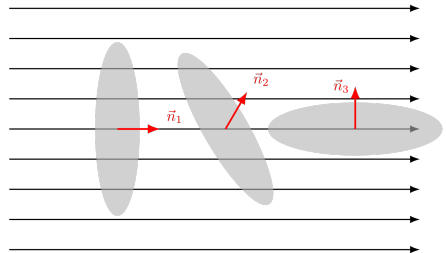
- Principe de fonctionnement
- Fonctionnement : Aimants Permanents
- Fonctionnement : Excitation Séparée
- Fonctionnement : autres types d'excitation
 - Fonctionnement : série
 - Fonctionnement : dérivation

Conservation du flux

Le **flux magnétique** Φ , 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 Φ s'exprime en Webers (Wb).

Conservation du flux

Le flux magnétique va se calculer avec la **densité de flux B** comme suit,

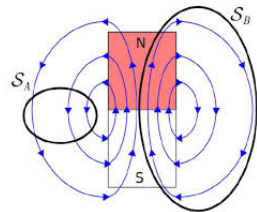
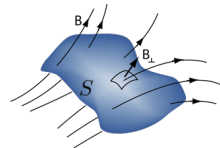
$$B_{\perp} S = \Phi$$

Densité de flux 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 :

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



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 **H** et la densité magnétique **B** dans un matériau,

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

avec μ la **perméabilité magnétique** du matériau.
Dans le vide,

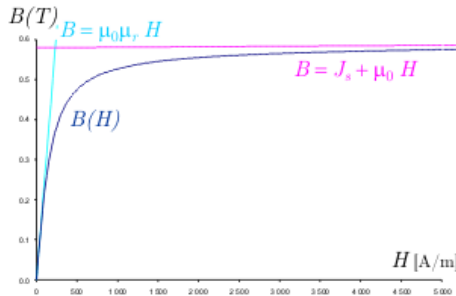
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \text{ (Henry par mètre)}$$

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

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

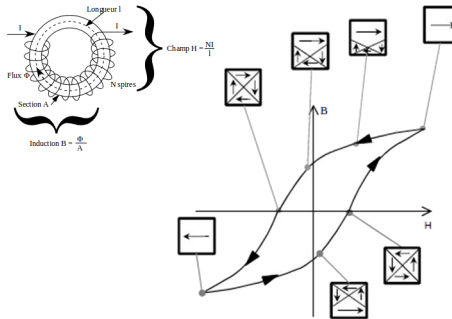
Loi de comportement

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



Loi de comportement

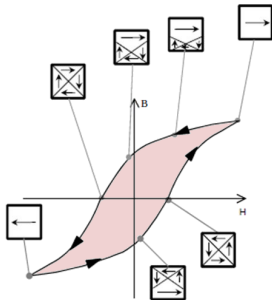
La perméabilité d'un matériau peut bifurquer!!! :



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).

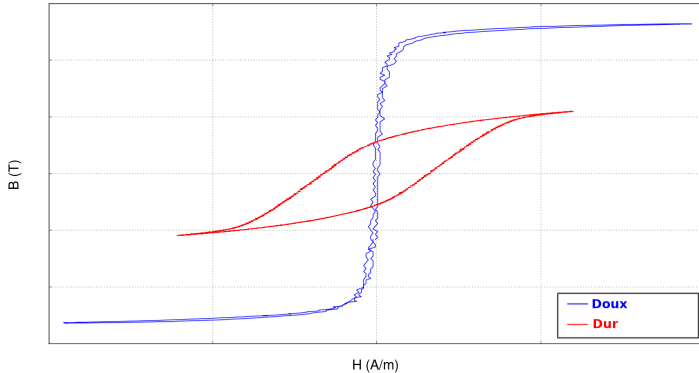


Les pertes par hystérésis : La rotation des domaines consomme de l'énergie. Pertes proportionnelles à la surface du cycle.

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

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

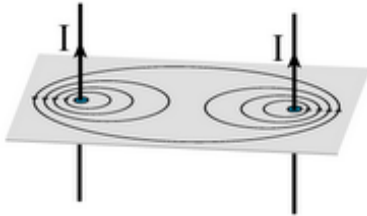
2 Machine à courant continue

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

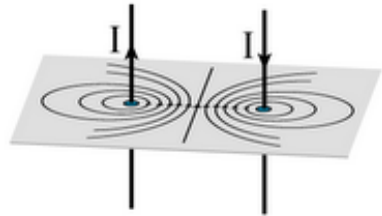
Forces d'origine magnétique

Deux conducteurs proches, parcourus par des courants...

Même direction :



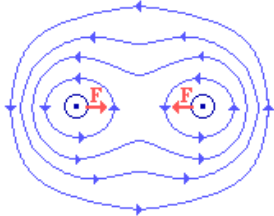
Directions opposées :



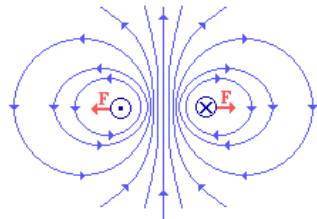
Forces d'origine magnétique

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

Même direction :

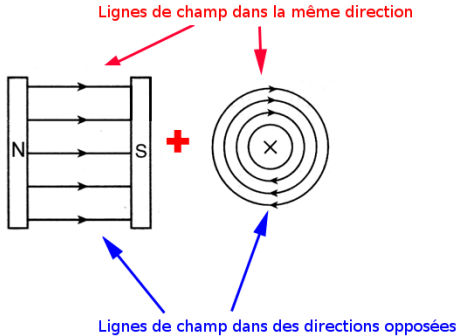


Directions opposées :



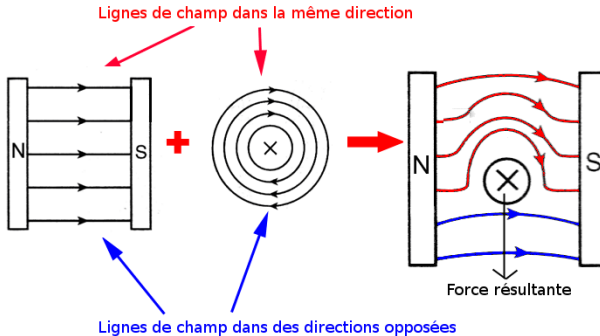
Forces d'origine magnétique

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



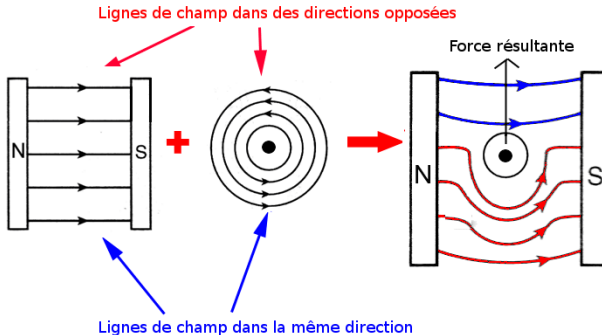
Forces d'origine magnétique

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.



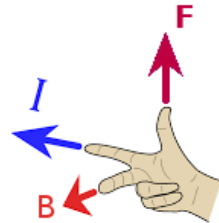
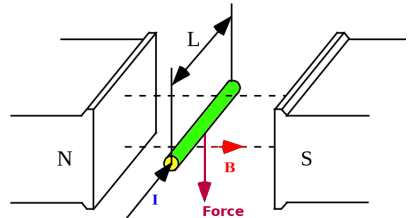
Les lignes de force (de champ) $\equiv$ fils élastiques.

Forces d'origine magnétique

L'intensité de la force dépend :

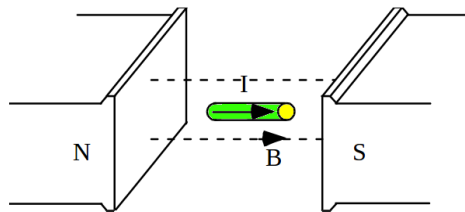
- de l'intensité du courant I ,
- de la longueur du conducteur soumise à l'induction L ,
- de la densité de flux magnétique (l'induction) B ,
- de l'orientation du conducteur dans le champ (angle θ).

$$F = ILB \sin \theta$$



Forces d'origine magnétique

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



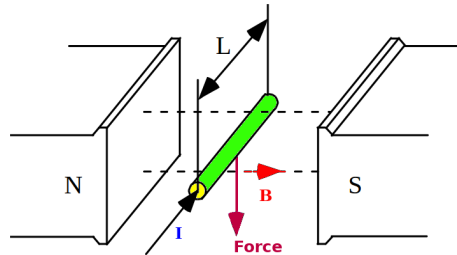
$$F = ILB \sin \theta$$

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 continue
 - 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

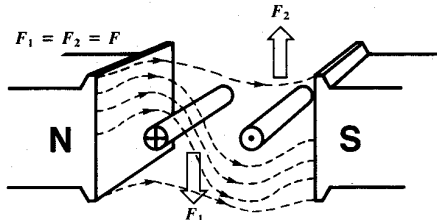
Rappel : force produite par un conducteur "plongé" dans un champ magnétique :



$$F = ILB \sin \theta$$

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 :

$$C = NILBd$$

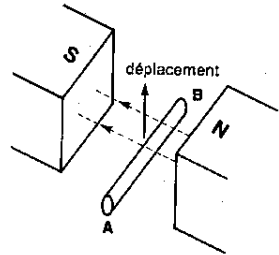
et comme la surface $S = Ld$ et que $\Phi = BS$,

$$C = K\Phi I$$

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 .



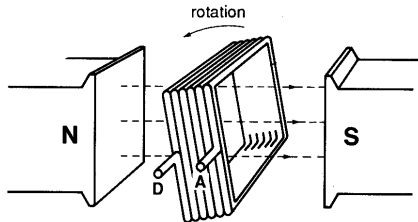
$$E = BLv$$

et comme $B = \Phi/S$,

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

Machine à courant continu : principe de fonctionnement

En utilisant des spires :



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

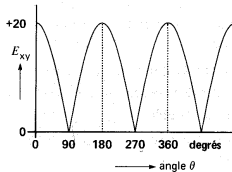
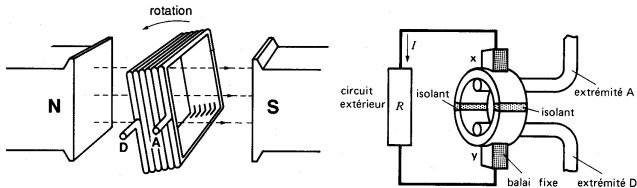
et comme $S = 2rL$ et que $v = r\Omega$,

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

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

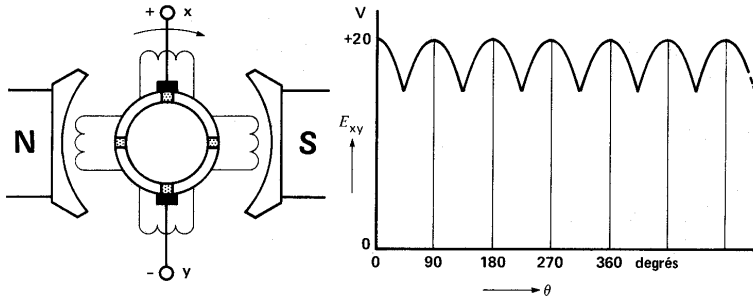
Machine à courant continu : principe de fonctionnement

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

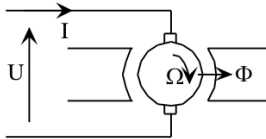
Augmentation du nombre de lames au collecteur et du nombre de bobines : lissage du signal de sortie $\Rightarrow$ un meilleur courant continu.



Machine à courant continu : principe de fonctionnement

$$E = K \Phi \Omega$$

$$C = K \Phi I$$

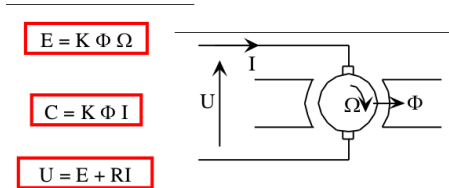


Les conducteurs, qui constituent le bobinage du rotor, ont une certaine résistance, et la circulation du courant I provoque, dans cette résistance, une chute de tension.

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 :

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

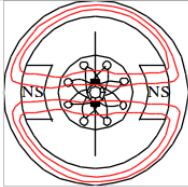
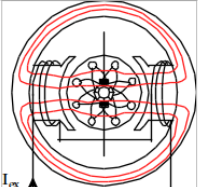
Le rendement η est donc égal à 1... pas de pertes, pas de chaleur produite.

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

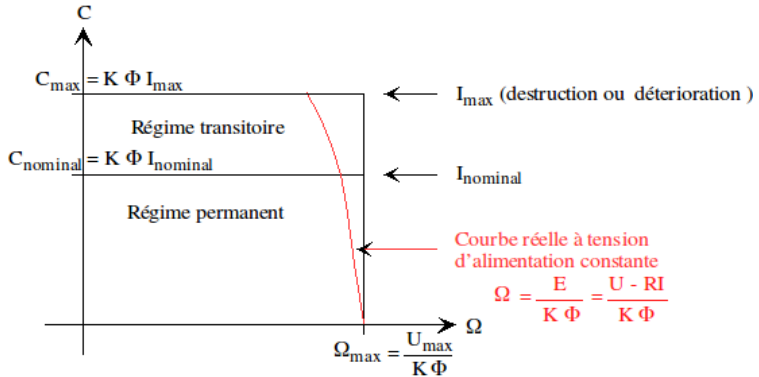
Machine à courant continu : Aimants Permanents

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

		
	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

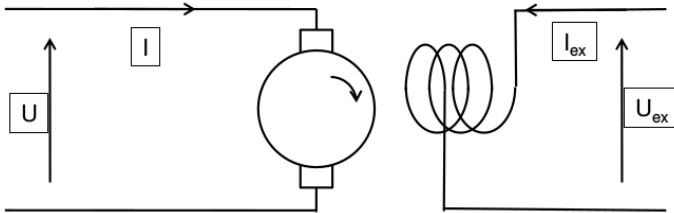


Sommaire

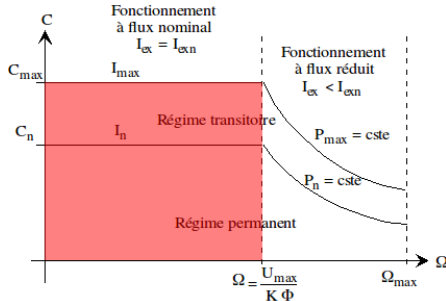
- 1 Magnétisme
 - Objectifs
 - Le champ magnétique : définitions
 - Courant électrique et champ magnétique
 - Loi d'Ampère
 - Conservation du flux
 - Loi de comportement
 - Forces d'origine magnétique
- 2 Machine à courant continu
 - Principe de fonctionnement
 - Fonctionnement : Aimants Permanents
 - **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} .



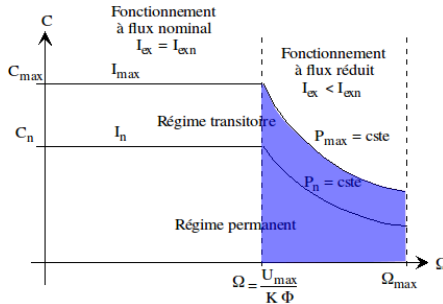
Machine à courant continu : Excitation Séparée



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 Φ 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.

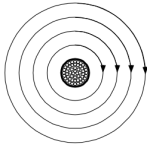
Sommaire

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

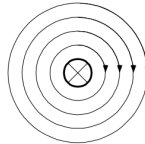
Machine à courant continu : autres types d'excitation

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).

$$I = 5, N = 100$$



$$I = 500, N = 1$$

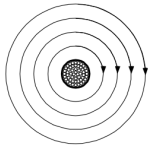


La résistance électrique est définie comme :

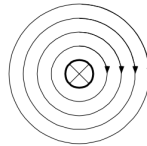
$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

avec l la longueur du conducteur, σ 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.



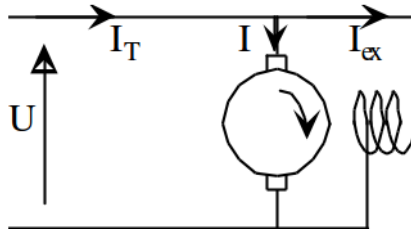
enroulement d'excitation fil gros :
 S grande, l petite $\Rightarrow R_{ex}$ petite.

Pour une même tension d'excitation U_{ex} : $I_{ex} = U_{ex}/R_{ex}$

enroulement d'excitation fil fin :	enroulement d'excitation fil gros :
$\Rightarrow I_{ex}$ petite.	$\Rightarrow I_{ex}$ 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**

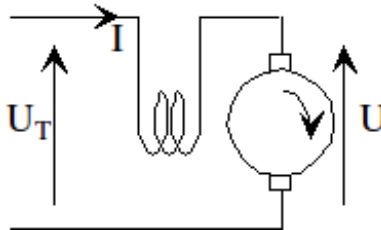


Quel solution pour le bobinage dérivation : N élevé ou faible ?
A cause de pertes Joule...

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

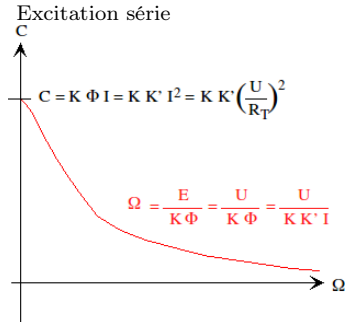
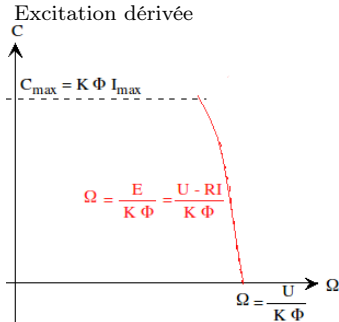


Quel solution pour le bobinage série : N élevé ou faible ?

A cause de pertes Joule...

Machine à courant continu : autres types d'excitation

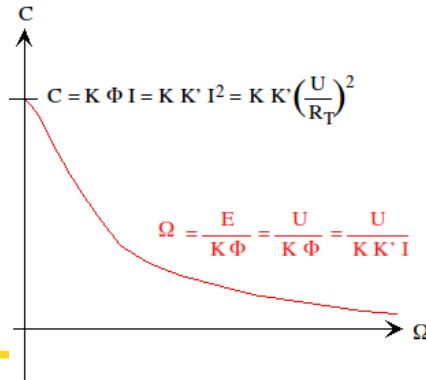
Les caractéristiques naturelles (à tension d'alimentation constante) de ces 2 moteurs sont très différentes.



Machine à courant continu : autres types d'excitation

Excitation série

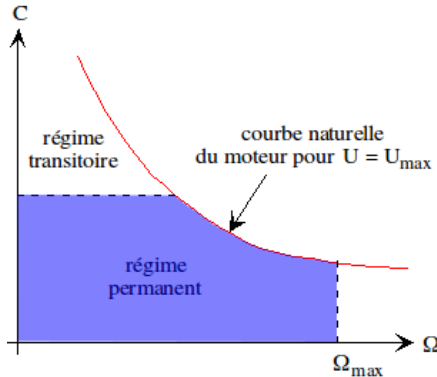
Le moteur série est presque exclusivement réservé aux **applications de traction**, grâce à son **fort couple de démarrage ($\rightarrow I^2$)**. Afin d'éviter le phénomène d'emballement le moteur doit toujours être accouplé à la charge (p.e. les roues).



Machine à courant continu : autres types d'excitation

Excitation série

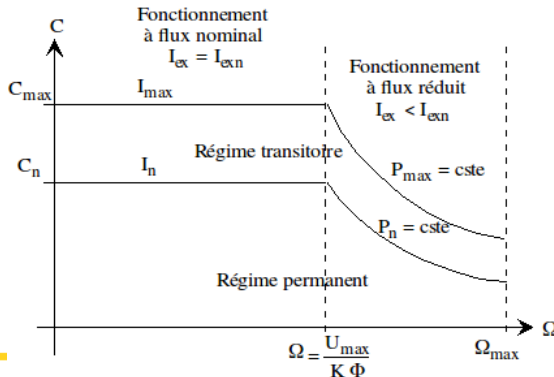
Le domaine de fonctionnement, à tension d'alimentation variable du moteur série, est limité par une **vitesse maximale**.



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

