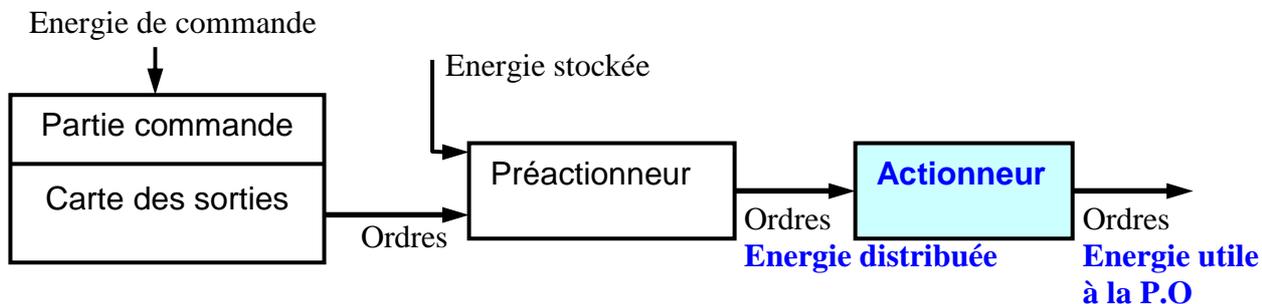


### I. Introduction

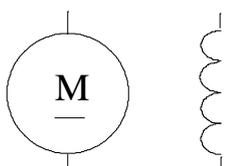
Les actionneurs sont situés dans la partie opérative d'un système automatisé. Ils font partie de la chaîne d'action de ce système. Les actionneurs transforment l'énergie de puissance fournie au système en énergie nécessaire à la réalisation des tâches.



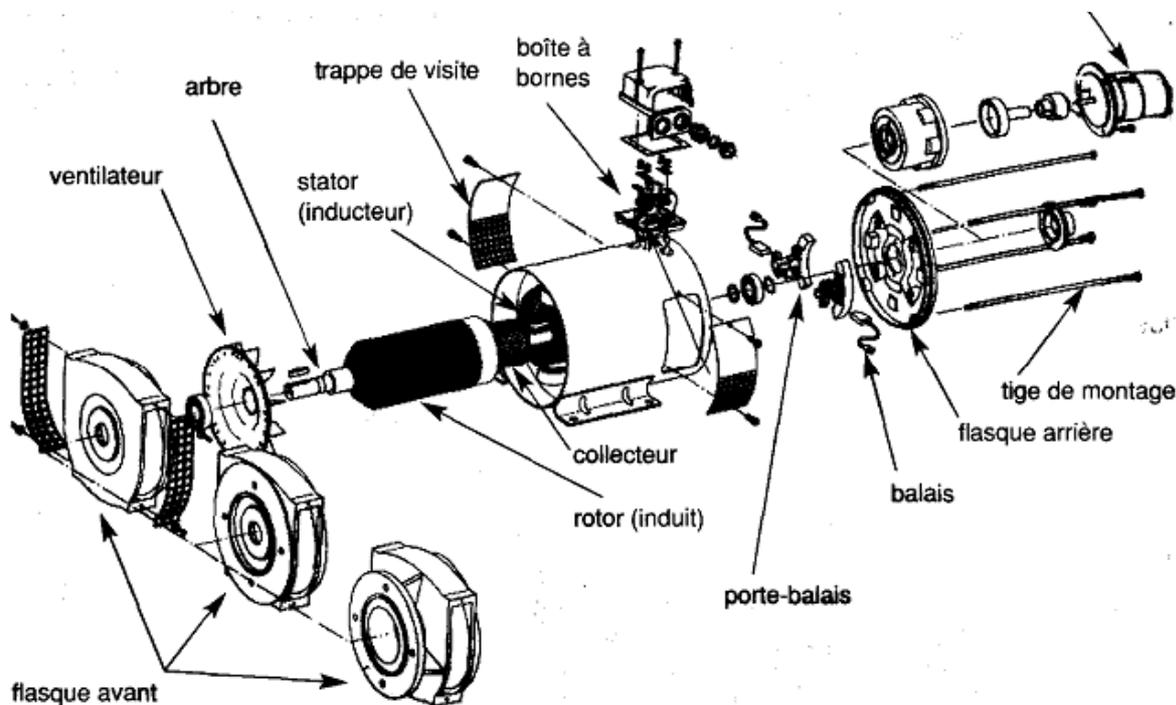
### II. Moteur électrique à courant continu

#### II.1. Symbole

Induit Inducteur



#### II.2. Constitution



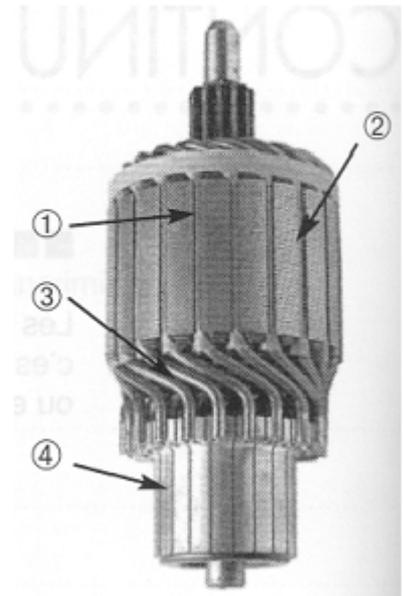
## II.3. Constituants électriques

### II.3.1. Inducteur

Situé dans le stator (partie fixe), il crée le champ d'induction magnétique. Il peut être formé d'aimants en ferrite ou de bobines parcourues par un courant continu.

### II.3.2. Induit

Solidaire du rotor (partie mobile ou tournante de la machine), il est le siège des forces nécessaires à son entraînement. Il est composé de spires placées dans des encoches (1) situées à la périphérie d'un empilement de tôles cylindriques (2). Les extrémités des spires (3) sont reliées sur les lames du collecteur (4).



### II.3.3. Collecteur

Il se compose de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, disposées de sorte à former un cylindre et reliées aux conducteurs de l'induit en des points régulièrement espacés.

### II.3.4. Balais

Les balais permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un **contact glissant** entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm<sup>2</sup> à quelques cm<sup>2</sup>, en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches, ...).

Ils sont équipés d'une tresse de raccordement et maintenus en place par un porte-balais solidaire du stator. Un ressort exerce une pression constante sur la partie en graphite quel que soit le degré d'usure du balai.



### Remarque

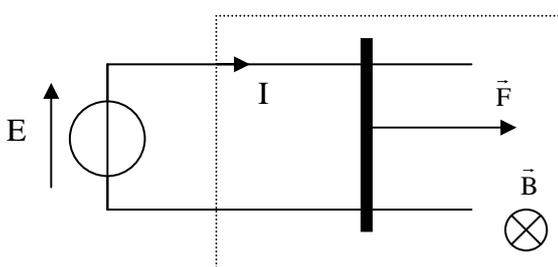
Généralement des pôles auxiliaires sont également présents dans les machines. Ils servent à réduire les étincelles au niveau des balais lors d'un changement de lame de collecteur. Ils sont constitués de bobinages placés perpendiculairement aux lignes de champ de l'inducteur et sont alimentés en série avec l'induit.

## II.4. Principe de fonctionnement :

### II.4.1. Rappels d'électromagnétisme

#### II.4.1.1. Force de Laplace (expérience des rails de Laplace)

Lorsqu'un conducteur, plongé dans un champ magnétique, est traversé par un courant continu, ce conducteur se met en mouvement sous l'action d'une force dite force de Laplace telle que :

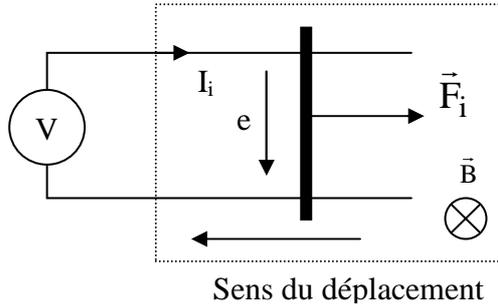


#### *Force de Laplace :*

- **Direction** : perpendiculaire au plan formé par le conducteur et le champ magnétique.
- **Sens** : donné par la règle des 3 doigts de la main droite.
- **Intensité** :  $F = B.I.L$  (lorsque le champ est perpendiculaire au conducteur)

### II.4.1.2. Force électromotrice d'induction

Si on déplace un conducteur dans un champ magnétique, il apparaît aux bornes de ce conducteur une f.é.m. induite.



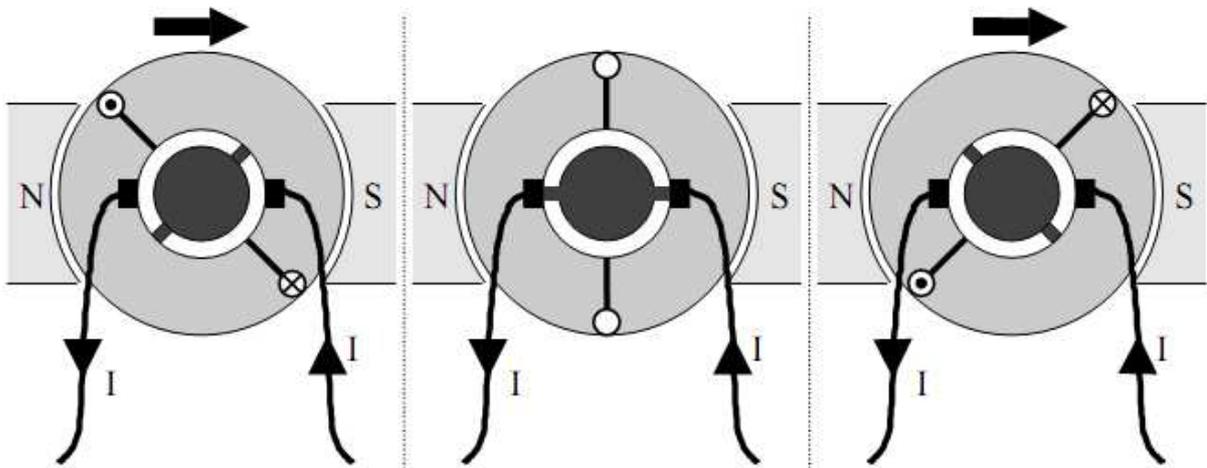
**Loi de Lenz :**  
*Tout phénomène induit s'oppose, par ses effets, à la cause qui lui a donné naissance.*

### II.4.1.3. Détermination du sens de la f.é.m.

Conformément à la loi de Lenz, la f.é.m. va s'opposer au déplacement du conducteur en générant une force induite de sens contraire. On en déduit le sens du courant induit (règle des 3 doigts de la main droite) et ainsi le sens de la f.é.m. (convention générateur).

### II.4.2. Fonctionnement

Considérons une machine simplifiée, c'est à dire bipolaire et constituée d'une seule spire (deux conducteurs actifs)



Lorsque les conducteurs actifs sont soumis au champ magnétique radial **B** (direction passant par le centre du rotor) créé par l'inducteur et qu'ils sont traversés par un courant continu **I** délivrée par une source extérieure, ils sont soumis à un couple de **forces de Laplace** entraînant la rotation du rotor.

### Remarques

Le collecteur et les balais permettent, à chaque demi-tour, d'inverser le sens du courant dans les conducteurs afin d'assurer la rotation.

Les conducteurs étant à présent en mouvement dans un champ magnétique, il va apparaître à leurs bornes une **f.é.m. induite** tendant à s'opposer à la rotation.

Cette f.é.m. induite, encore appelée force contre électromotrice, s'exprime :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$$

Avec  $\left\{ \begin{array}{l} K : \text{constante qui ne dépend que des caractéristiques de la machine (ex : nombre de conducteurs).} \\ \Phi : \text{Flux utile sous un pôle (Wb)} \\ \Omega : \text{vitesse de rotation (rad/s)} \end{array} \right.$

### II.5. Réversibilité des machines à courant continu

Les machines à courant continu peuvent fonctionner tant en moteur qu'en génératrice :

- si on alimente l'induit, le rotor se met à tourner,
- si on fait tourner le rotor, l'induit génère une f.é.m. E.

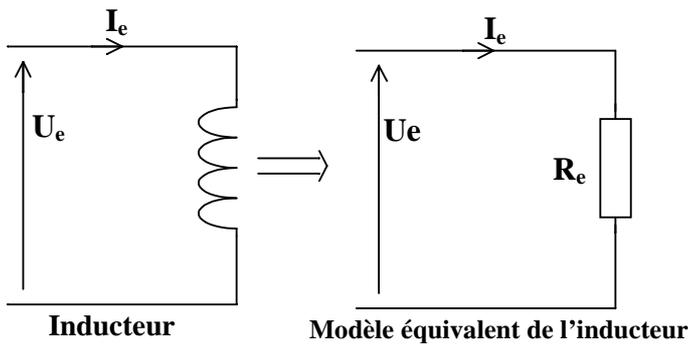
On dit que les machines à C.C. sont **réversibles**.

### II.6. Modèle équivalent du moteur à courant continu

#### II.6.1. Modèle équivalent de l'inducteur

Lorsque l'inducteur n'est pas à aimants permanents, il est constitué de bobines en série traversées par un courant continu  $I_e$ , appelé **courant d'excitation**.

On sait, de plus, qu'en courant continu, une bobine est équivalente à sa résistance.



$$U_e = R_e \cdot I_e$$

Avec

$R_e$  : résistance de l'inducteur ( $\Omega$ )

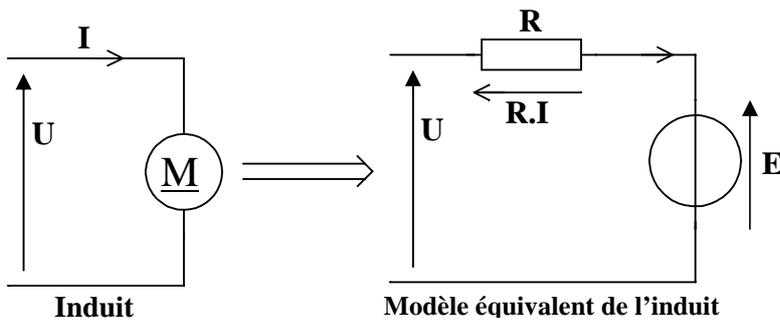
$U_e$  : tension d'alimentation de l'inducteur (V)

$I_e$  : intensité du courant d'excitation (A)

**Remarque :** Ces trois grandeurs sont liées par la loi d'Ohm

#### II.6.2. Modèle équivalent de l'induit

L'induit, soumis à une tension U dite tension d'induit, est constitué de conducteurs, de résistance R, traversés par un courant continu I dit courant d'induit. Il génère une f.é.m. ou une f.c.é.m. suivant qu'il fonctionne en génératrice ou en moteur.



Loi des mailles :

$$U - R \cdot I - E = 0 \quad \text{donc :}$$

$$U = E + R I$$

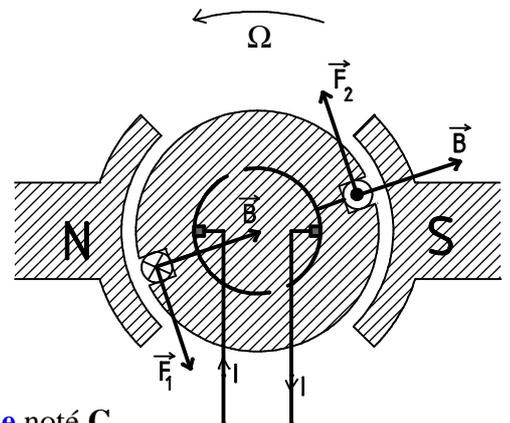
### II.7. Couple électromagnétique

#### II.7.1. Mise en évidence

Les deux conducteurs sont soumis à un couple de force  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$ .

On rappelle qu'un couple de force se caractérise par son moment noté C.

Dans le cas général (de nombreux conducteurs), la somme des moments des couples de forces agissant sur l'ensemble des conducteurs est appelée le **moment du couple électromagnétique** noté  $C_{em}$ .



### II.7.2. Expression du moment du couple électromagnétique

On définit la **puissance électromagnétique**  $P_{em}$  de l'induit comme étant :

$P_{em} = E.I$

Avec :  $E$  : f.é.m. de l'induit (V)  
 $I$  : Intensité du courant d'induit (A)  
 $P_{em}$  : puissance électromagnétique (W)

Cette puissance correspondant à la puissance développée par le couple électromagnétique tournant à la vitesse  $\Omega$ , elle peut aussi s'écrire :

$P_{em} = C_e . \Omega$

Avec :  $C_e$  : moment du couple électromagnétique (N.m)  
 $\Omega$  : vitesse angulaire de rotation (rad/s)  
 $P_{em}$  : puissance électromagnétique (W)

### II.7.3. Autre expression du moment du couple électromagnétique

$P_{em} = C_{em} . \Omega = E.I$       donc :  $C_{em} = E.I / \Omega$

De plus, on sait que :       $E = K . \Phi . \Omega$

Donc :       $C_{em} = K . \Phi . \Omega . I / \Omega$

Le moment du couple électromagnétique peut donc s'exprimer :

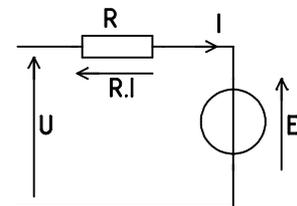
$C_{em} = K . \Phi . I$

### II.8. Bilan des puissances

Relation correspondante :       $U = E + R.I$

En multipliant par  $I$ , on obtient :       $U.I = E.I + R.I^2$

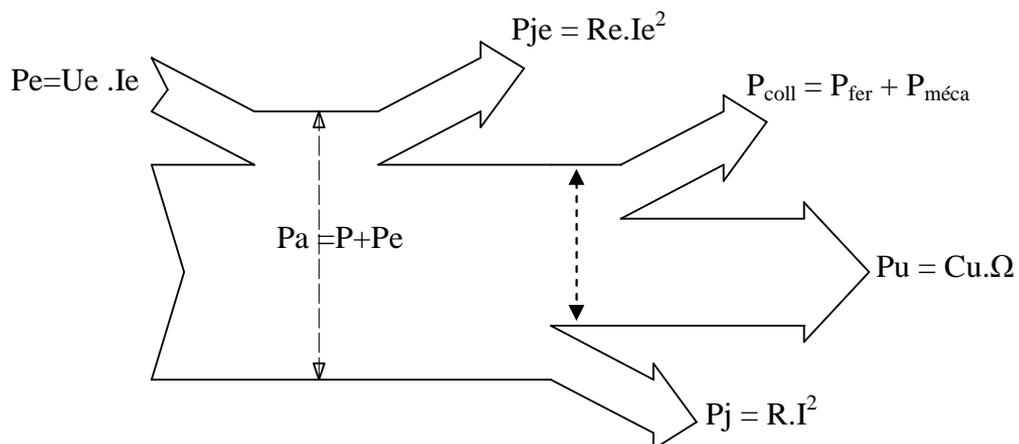
Puissance absorbée
Puissance électromagnétique
Pertes par effet Joule dans l'induit



De plus, le rotor (matériau ferromagnétique) est en mouvement dans un champ magnétique, d'où l'apparition de **pertes magnétiques** notée  $P_{fer}$ .

D'autre part, le rotor en rotation sera le siège de **pertes mécaniques** notées  $P_{méca}$ .

**En résumé :**



**Notations :**

- P : puissance absorbée par l'induit (électrique)
- $P_e$  : puissance absorbée par l'inducteur (électrique)
- $P_a$  : puissance totale absorbée par le moteur
- $P_{em}$  : puissance électromagnétique
- $P_{je}$  : pertes par effet Joule dans l'inducteur
- $P_j$  : pertes par effet Joule dans l'induit
- $P_{coll}$  : pertes collectives (pertes magnétiques + pertes mécaniques)
- $P_u$  : puissance utile fournie par le moteur (mécanique)
- $C_e$  : moment du couple électromagnétique
- $C_u$  : moment du couple utile
- $\Omega$  : vitesse de rotation

**Remarque :**

Toute la puissance absorbée par l'inducteur ( $P_e$ ) est convertie en pertes par effet Joule ( $P_{je}$ )

**II.9. Rendement :**

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

$$\text{Rendement} = \text{Puissance fournie (utile)} / \text{Puissance totale absorbée.} = P_u / P_a$$

$$P_a = U.I + (\text{puissance absorbée par l'inducteur})$$

$$P_u = C_u.\Omega, \text{ d'où rendement}$$

$$\eta = (C_u.\Omega) / (U.I + P_e) = (P_a - \sum \text{pertes}) / P_a$$

**II.10. Comportement au démarrage**

$$U = E + RI \text{ (équation toujours vraie)}$$

Au démarrage, la vitesse de rotation est nulle ( $n = 0$ ) donc  $E = 0$ . Le courant de démarrage vaut donc :

$$I_d = U/R \quad \text{et} \quad C_d = k'.I_d = k'.U/R$$

Le courant peut-être très important au démarrage et détruire les contacts collecteur-balai : il faut donc limiter ce courant  $I_d$  : utilisation de démarreur, variateurs de vitesses.

Le couple de démarrage est aussi très important et pas forcément toléré par les organes mécaniques ...

**II.11. Exercices :**

**EX1 :** La plaque signalétique d'un moteur à courant continu indique :  $P_u = 36,3 \text{ KW}$ ,  $n = 1150 \text{ tr/min}$ ,  $U = 440\text{V}$  et  $I = 68,5\text{A}$   
Calculer le couple utile, la puissance absorbée, le rendement.

**EX2 :** Un moteur, alimenté sous  $300 \text{ V}$  continu, a une f.e.m  $E$  de  $284\text{V}$  en fonctionnement normal.  
La résistance de l'induit est  $R_i = 0,5 \Omega$ .

Calculer:

La chute de tension  $U_i$  dans l'induit.

L'intensité  $I_a$  du courant absorbé.

L'intensité  $I_d$  qui serait absorbée au démarrage si le moteur était dépourvu de rhéostat.

La résistance  $R_h$  du rhéostat de démarrage pour que l'intensité au démarrage soit limitée à 1,8 fois l'intensité en charge nominale.