

# Le moteur à courant continu

## 1. Place des moteurs électriques dans les systèmes

Dans un système, la **chaîne d'énergie** a pour but d'agir sur la matière d'oeuvre du système, sur ordre de la **chaîne d'information**. Pour cela, la chaîne d'énergie doit souvent effectuer une action mécanique dont la source est réalisée par la fonction **convertir** contenant des actionneurs (figure 1).

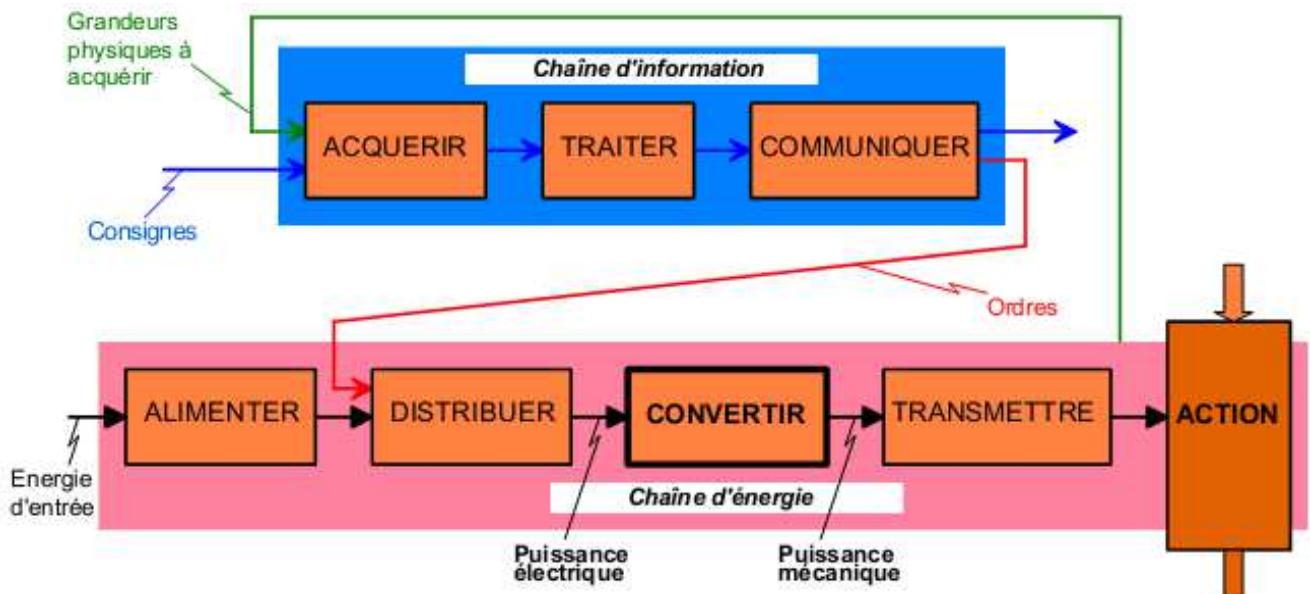


Figure 1 : Structure fonctionnelle globale d'un système

Parmi les différents actionneurs utilisés dans les systèmes, le **moteur à courant continu** réalise la conversion de l'**énergie électrique** (caractérisée par une tension et un courant) en une **énergie mécanique** (caractérisée par une vitesse de rotation et un couple).

## 2. Fonction d'un moteur à courant continu

Un moteur à courant continu (MCC) est un convertisseur tournant d'**énergie électrique** en **énergie mécanique** (figure 2).

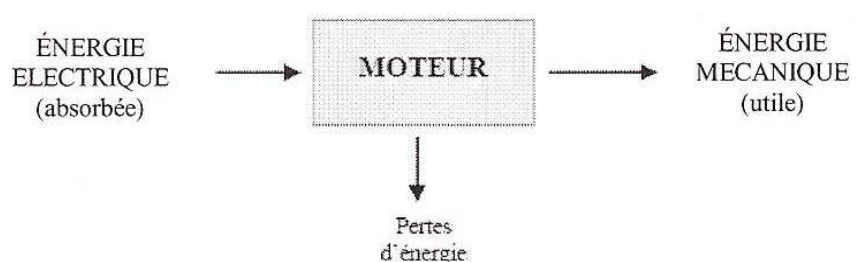
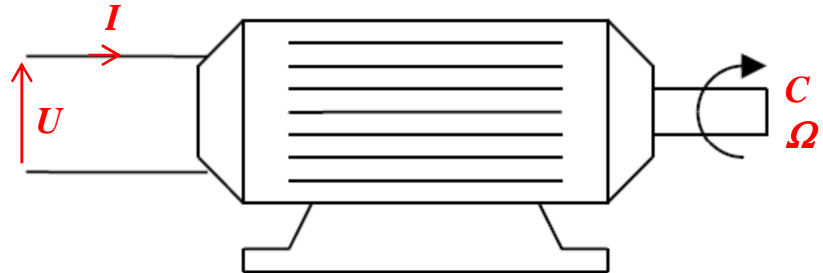


Figure 2 : Le moteur à courant continu

### 3. Grandeurs physiques autour du moteur à courant continu

- L'**énergie électrique** se présente sous forme de **tension**  $U$  [V] et de **courant**  $I$  [A] continus ou unidirectionnels (figure 3).
- L'**énergie mécanique** se présente sous forme d'un **couple**, de moment  $C$  [N.m], susceptible de tourner à la **vitesse angulaire**  $\Omega$  [rad.s<sup>-1</sup>] (figure 3).

Figure 3 : Moteur électrique



Description et unité de mesure de chacune des 4 grandeurs physiques présentes autour du moteur à courant continu :

	<i>Symbole de la grandeur physique</i>	<i>Description de la grandeur physique</i>	<i>Unité de la grandeur physique</i>	<i>Symbole de l'unité de mesure</i>
<b>Grandeurs d'entrée</b>	$U$	Tension continue ou unidirectionnelle aux bornes du moteur	<b>Volt</b>	<b>V</b>
	$I$	Courant continu traversant le moteur	<b>Ampère</b>	<b>A</b>
<b>Grandeurs de sortie</b>	$C$ ou $C_u$	Couple utile délivré par l'arbre moteur	<b>Newton.mètre</b>	<b>N.m</b>
	$\Omega$	Vitesse angulaire de rotation de l'arbre moteur	<b>Radian par seconde</b>	<b>rad.s<sup>-1</sup></b>



Attention



La vitesse angulaire de rotation du moteur, notée  $\Omega$ , est ici exprimée en **radians par seconde**. Pour obtenir ou utiliser d'autres unités de vitesse de rotation  $n$  (tours par minute, ...) il conviendra d'effectuer au bon moment les conversions adéquates.

Exemple :  $\Omega = 1 \text{ rad.s}^{-1} \Leftrightarrow n = \frac{60}{2\pi} \text{ tr.min}^{-1} \quad \left( \Omega = \frac{2\pi.n}{60} \right)$

## 4. Description du moteur à courant continu

### 4.1. Constitution du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu comprend (figure 4, tableau 1 et figure 5) :

- un circuit magnétique (**stator** ② et **rotor** ③ séparés par un entrefer ⑤).
- deux circuits électriques :
  - un circuit électrique sur le stator (**inducteur**) lorsque le moteur n'est pas à aimants permanents
  - un circuit électrique sur le rotor (**induit**)
- un collecteur ⑨ solidaire du rotor, qui, associé à des balais ⑩, permet de relier l'induit du moteur au circuit électrique extérieur.

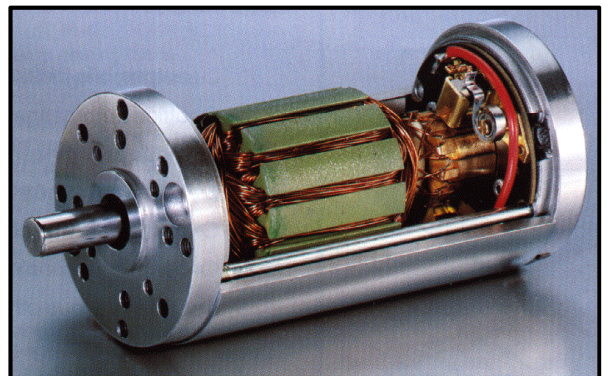
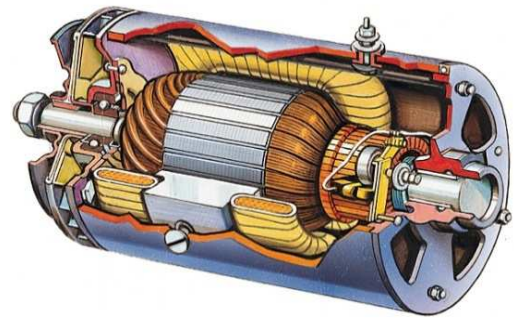
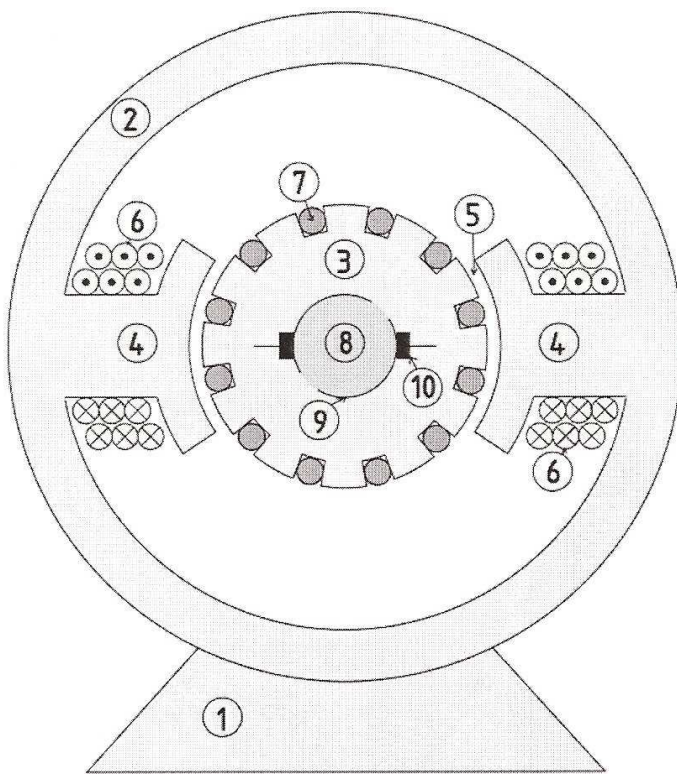
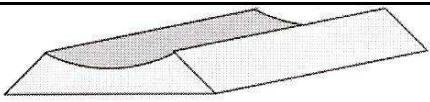
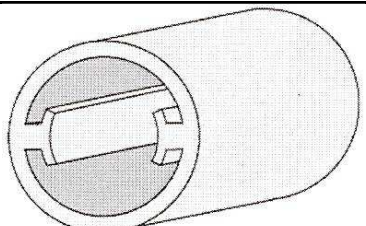


Figure 4 : Constitution du moteur à courant continu

①		Socle	Partie fixe sur laquelle repose le moteur.
②		Stator	Partie fixe du circuit magnétique du moteur conçue en matériau ferromagnétique.



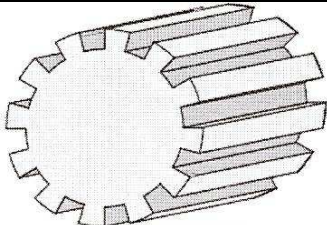
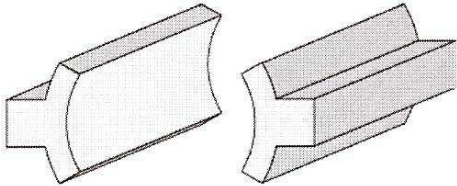
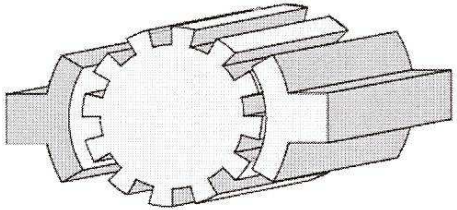
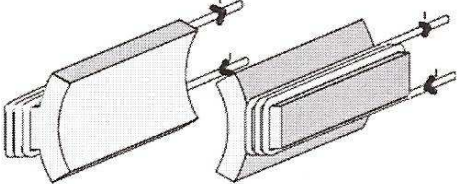
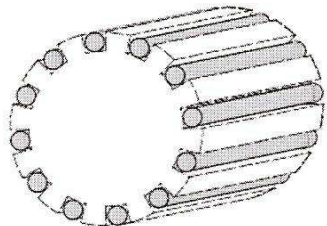
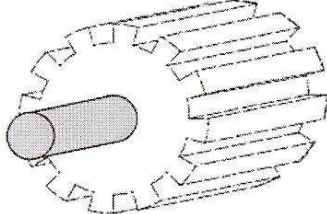
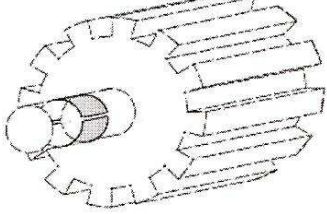
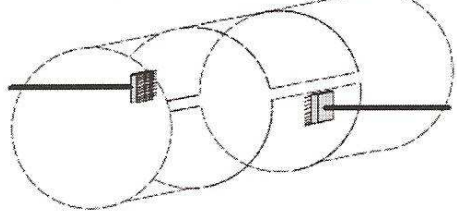
③		Rotor	<i>Partie tournante du circuit magnétique du moteur conçue en matériau ferromagnétique.</i>
④		Pôles du stator	<i>Partie du stator permettant de fournir dans l'entrefer un champ magnétique radial (dirigé vers le centre du rotor). Leur nombre est toujours pair.</i>
⑤		Entrefer	<i>Espace séparant le stator du rotor et permettant la rotation du rotor.</i>
⑥		Bobines de l'inducteur	<i>Enroulements (bobines) de cuivre, portés par le stator, traversés par un courant continu générant le champ magnétique</i>
⑦		Bobines de l'induit	<i>Enroulements (bobines) de cuivre, placés dans des encoches creusées dans le rotor, connectés au circuit extérieur par l'intermédiaire du collecteur et des balais.</i>
⑧		Arbre du moteur	<i>Partie tournante, solidaire du rotor, sur laquelle sont notamment, fixées les lames du collecteur.</i>
⑨		Collecteur	<i>Lames de cuivre fixées sur l'arbre et reliées aux enroulements de l'induit.</i>
⑩		Balais	<i>Contacts glissants, solidaires du stator, permettant la liaison électrique entre le circuit extérieur et les enroulements de l'induit.</i>

Tableau 1

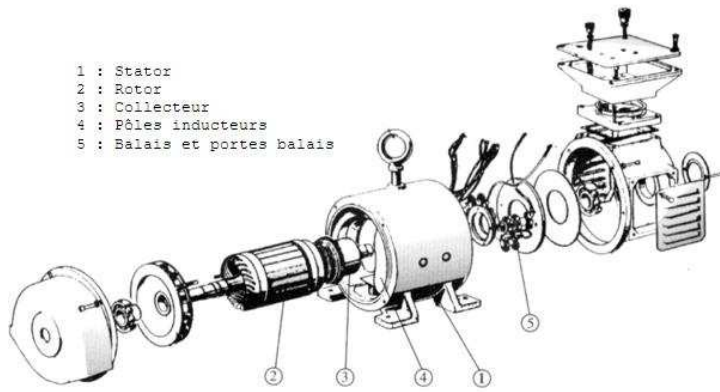


Figure 5 : Vue éclatée du moteur à courant continu

#### 4.2. L'inducteur ④ porté par le stator

L'inducteur permet la création d'un **champ magnétique** au niveau de l'entrefer. Ce champ magnétique est généré par des **aimants permanents** ou par un **bobinage** enroulé autour des pôles du stator ④ et alimenté en courant continu.



Aimants permanents  
(moteur bipolaire)



Bobinages enroulés autour  
des pôles du stator (moteur  
tétrapolaire)

#### 4.3. L'induit ⑦ porté par le rotor

C'est un **circuit électrique** constitué de conducteurs en série enroulés sur le rotor et placés dans des encoches. Ce circuit subit les phénomènes **électromagnétiques**.

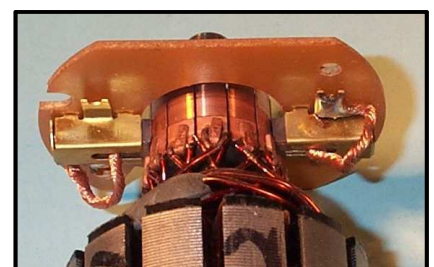


Ce **bobinage induit** est parcouru par un courant continu fixe et perpendiculaire au champ magnétique. Ce courant est imposé par une alimentation.

#### 4.4. Collecteur et balais

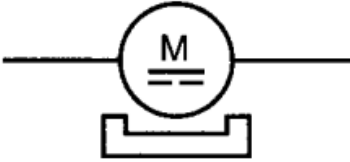
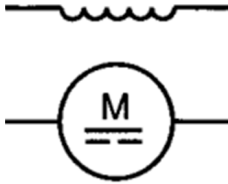
Le **collecteur** est un ensemble de lames de cuivre isolées les unes des autres et situées en bout d'arbre du moteur ⑧.

Les **balais** sont portés par le stator et frottent sur le collecteur de façon à assurer la liaison électrique entre le rotor et le circuit électrique extérieur.



Balais montés sur le collecteur

## 5. Symboles

<u>Moteur à aimants permanents</u>	<u>Moteur à bobinage inducteur</u>
	

## 6. Fonctionnement du moteur à courant continu

### 6.1. Principe d'électromagnétisme

#### a) Force électromagnétique et loi de Laplace

Un conducteur électrique, placé dans un champ magnétique d'induction  $B$  et parcouru par un courant continu  $I$ , est soumis à une **force électromagnétique**  $\vec{F}$  qui tend à le déplacer.

Cette force est appelée **force de Laplace** (figure 8).

⇒ Il y a **transformation** d'énergie **électrique** en énergie **mécanique**.

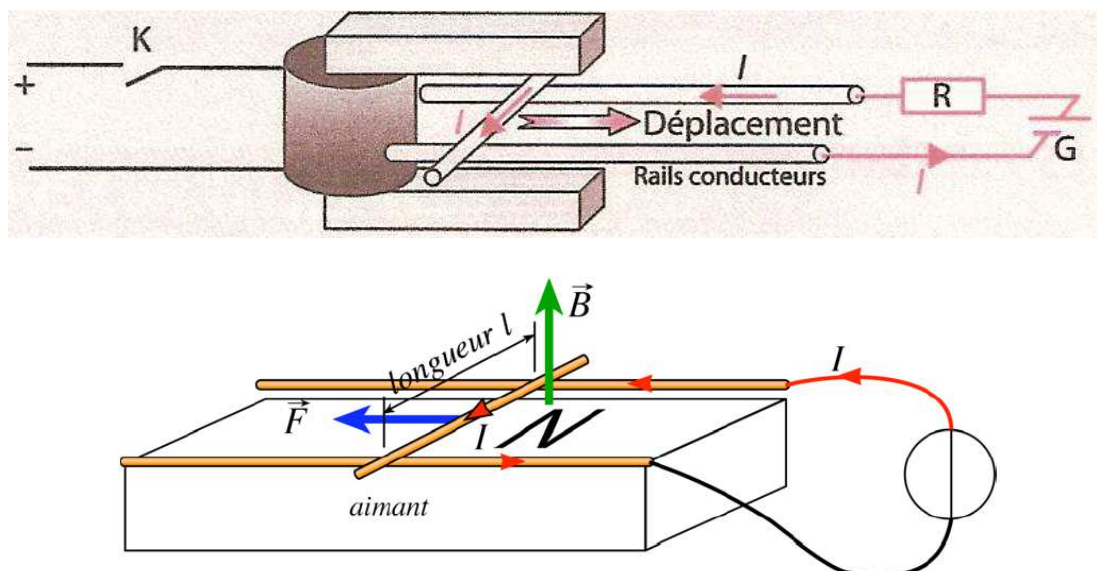


Figure 8 : La force de Laplace est à l'origine du déplacement de l'élément conducteur sur les deux rails.

Cette force de Laplace (figure 8) a les caractéristiques suivantes :

- Le point d'application, situé au **milieu de la portion** de conducteur soumis à l'induction magnétique  $\vec{B}$ .

- la direction, **perpendiculaire** au **plan** formé par le conducteur et le vecteur induction magnétique  $\vec{B}$ .
- le sens, déterminé par la règle des trois doigts de la **main droite** (figure 9) :  $\vec{F}$ ,  $I$ ,  $\vec{B}$  équivalent à pousse, index, majeur.
- la valeur, donnée par la formule :

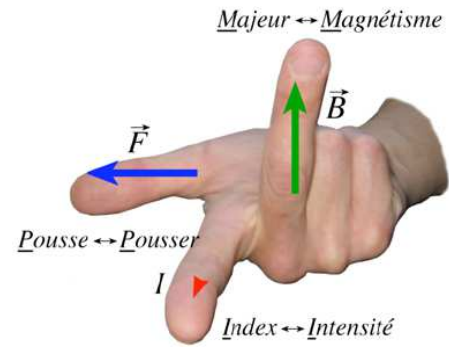


Figure 9 : Force électromagnétique et règle de la main droite

$B$  : induction magnétique en tesla [T]

$$F = B.I.l.\sin\alpha$$

$I$  : intensité du courant en ampère [A]

$l$  : longueur du conducteur en mètre [m]

$F$  : force en newton (N)

$\alpha$  : angle formé entre le conducteur et le vecteur induction

Notons que si :

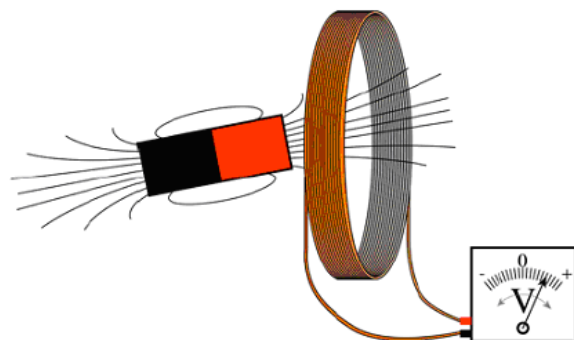
- le conducteur est parallèle au vecteur induction, la force de Laplace est **nulle**.
- le conducteur est perpendiculaire au vecteur induction :  $\alpha = 90^\circ$  et  $\sin\alpha = 1$ , la force de Laplace est alors obtenu par la formule :  **$F = B.I.l$**

### b) Loi de Faraday

Tout circuit soumis à une variation de flux d'induction magnétique (conducteur déplacé dans un champ magnétique fixe ou conducteur fixe soumis à un champ magnétique variable), donne naissance à ses bornes à une **force électromotrice** (f.é.m.) ou tension  $E$  induite qui représente la variation du champ magnétique à travers une spire (figure 10).

⇒ Il y a transformation de l'énergie **mécanique** en énergie **électrique**.

Figure 10 : En remuant une bobine devant un aimant, non alimentée, on observe une tension à ses bornes, il y a création d'une force électromotrice.



### Loi de Lenz :

Le phénomène induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui donne naissance.



### Détermination du sens de la f.é.m. :

Conformément la loi de Lenz, la f.é.m.  $E$  va s'opposer au déplacement du conducteur en générant une force induite de sens contraire.

## 6.2. Fonctionnement du moteur

Considérons un moteur simplifié c'est à dire bipolaire et constitué d'un bobinage induit à une seule spire conductrice (figure 11).

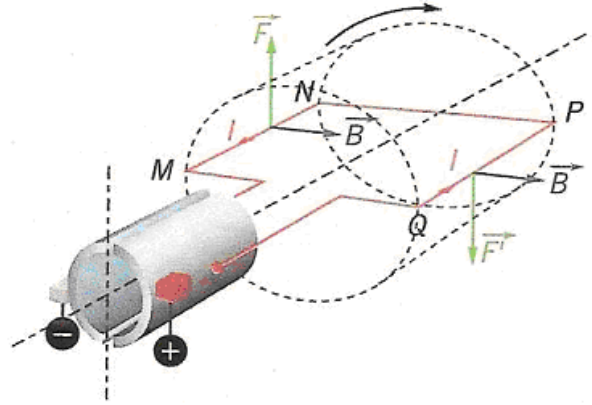


Figure 11

Alimentée en courant continu par une source extérieure de tension  $U$  et placée dans un champ magnétique radial (direction passant par le centre du rotor) créé par l'inducteur, une spire du bobinage induit est soumise aux forces de Laplace  $\vec{F}$  et  $\vec{F}'$ . Ce **couple** de forces ( $\vec{F}, \vec{F}'$ ) fait **tourner** la spire, donc le **rotor**.

Remarque : Le sens de rotation dépend du sens du courant d'induit  $I$ . Pour inverser le sens de rotation, on **inversera** le **courant** dans le bobinage induit donc le sens de la tension d'alimentation  $U$  de l'induit.

Les conducteurs étant à présent en mouvement dans un champ magnétique, ils vont être déplacés dans un champ magnétique fixe et il va apparaître à leurs bornes une **force électromotrice** (f.é.m.) induite tendant à s'opposer la rotation (lois de Faraday et de Lenz). Cette f.é.m. induite  $E$ , encore appelée parfois force contre électromotrice (f.c.é.m.), s'exprime :

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

$E$  : force électromotrice en volt [V]

$K'$  : constante liée à la structure du moteur et dépendant de ses caractéristiques de construction en  $[V / Wb \cdot rad \cdot s^{-1}]$

$\Phi$  : flux utile du champ magnétique sous un pôle en Webers [Wb]

$\Omega$  : vitesse angulaire en radian par seconde  $[rad \cdot s^{-1}]$

Remarque : Le champ magnétique inducteur et son flux à travers les spires de l'induit peuvent être produits de deux façons différentes :



- ❶ Par des **aimants permanents**. Dans ce cas le flux inducteur est **constant** et ne peut être modifié.
- ❷ Par un **bobinage** alimenté par une source de tension continue  $U_e$  et parcouru par un courant  $I_e$  dit **courant d'excitation**. Dans ce cas, le flux inducteur  $\Phi$  peut-être modifié.

Si le moteur fonctionne à flux constant :

$$E = K.\Omega$$

$E$  : force électromotrice en volt [V]

$K$  : constante liée à la structure du moteur et dépendant de ses caractéristiques de construction en  $[V / rad.s^{-1}]$  ( $K = K' . \Phi$ )

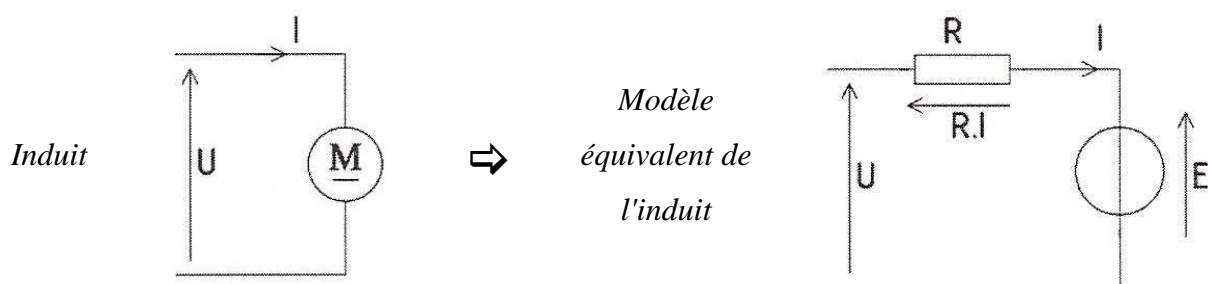
$\Omega$  : vitesse angulaire en radian par seconde  $[rad.s^{-1}]$

⇒ La f.é.m. induite  $E$  est **proportionnelle** à la vitesse angulaire du moteur.

## 7. Modèle équivalent de l'induit des moteurs à courant continu

Le circuit d'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**.

Lors de la rotation du rotor, ce circuit "coupe" le champ magnétique qui, lui, est fixe. Ainsi, dès qu'il y a rotation du moteur, le circuit d'induit devient le siège d'une f.é.m. (force électromotrice) dite "interne"  $E$ .



$U$  : tension d'alimentation de l'induit [V] ;  $E$  : f.é.m. de l'induit [V]

$R$  : résistance interne de l'induit [ $\Omega$ ] ;  $I$  : intensité du courant dans l'induit [A]

Ces grandeurs sont liées par la relation électrique :

$$U - R.I - E = 0 \quad (\text{loi des mailles})$$

Donc :

$$U = E + R.I$$

Remarques :

- Si le moteur à courant continu fonctionne à flux constant :  $E = K.\Omega$  donc  $\Omega = \frac{E}{K}$

De plus, on sait que :  $E = U - R.I$

La vitesse angulaire peut donc s'exprimer :

$$\Omega = \frac{U - R.I}{K}$$

- La vitesse angulaire dépend essentiellement de la tension d'alimentation  $U$  de l'induit ( $R$  étant faible  $\Rightarrow R.I \ll U$ ). La vitesse angulaire augmente si la tension d'alimentation  $U$  de l'induit augmente et inversement.

## 8. Couple électromagnétique

### 8.1. Mise en évidence

Considérons un moteur simplifié, c'est à dire bipolaire et constitué d'une seule spire conductrice. Les conducteurs de la spire sont soumis à un **couple de force**  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  (figure 12). On rappelle qu'un couple de force se caractérise par son moment noté **C**.

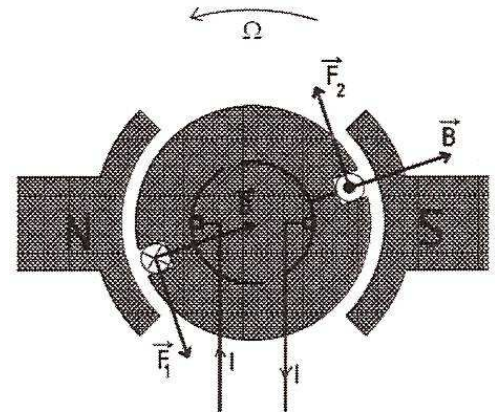


Figure 12 : Couple de force  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$

Remarque : Le moment d'un couple est parfois aussi noté **T** (en anglais, *torque* = couple).

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

### 8.2. Expression de la puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m.  $E$  et s'il est parcouru par un courant  $I$ , il reçoit une **puissance électromagnétique**  $P_{EM}$  comme étant :

$$P_{EM} = E.I$$

$P_{EM}$  : puissance électromagnétique en watt [W]

$E$  : f.é.m. de l'induit en volt [V]

$I$  : intensité du courant dans l'induit en ampère [A]

D'après le principe de **conservation** de l'énergie, cette puissance correspondant à la puissance développée par le couple électromagnétique tournant à la vitesse angulaire  $\Omega$ , elle peut aussi s'écrire :

$P_{EM} = C_{EM} . \Omega$	$C_{EM}$ : moment du couple électromagnétique produit en newton.mètre [ $N.m$ ] $\Omega$ : vitesse angulaire en radian par seconde [ $rad.s^{-1}$ ] $P_{EM}$ : puissance électromagnétique en watt [ $W$ ]
----------------------------	--

Remarque : La puissance électromagnétique  $P_{EM}$  est la partie de la puissance **électrique** du moteur convertie en puissance **mécanique**.

### 8.3. Expression du moment du couple électromagnétique

Puisque  $P_{EM} = C_{EM} . \Omega = E . I$  donc  $C_{EM} = \frac{E . I}{\Omega}$

De plus, si le moteur à courant continu fonctionne à flux constant, on sait que :  $E = K . \Omega$

Le moment du couple électromagnétique peut donc s'exprimer :

$C_{EM} = K . I$	$C_{EM}$ : moment du couple électromagnétique produit en newton.mètre [ $N.m$ ] $K$ : constante liée à la structure du moteur et dépendant de ses caractéristiques de construction en [ $N.m / A$ ] $I$ : intensité du courant dans l'induit en ampère [ $A$ ]
------------------	--

⇒ Le moment du couple électromagnétique est **proportionnel** à l'intensité du courant dans l'induit.

Remarque : La constante  $K$  peut être exprimée en [ $N.m / A$ ] ou en [ $V / rad.s^{-1}$ ].

## 9. Bilan des puissances et rendement $\eta$ du moteur à courant continu

Il est important d'identifier les divers éléments des modèles équivalents du moteur à courant continu en termes de **puissance**. Il est également important de porter une attention particulière à l'expression du **rendement** du moteur.

Pour le moteur à courant continu, l'alimentation électrique impose une tension d'induit  $U$ , souvent constante, la vitesse de rotation du moteur et le courant d'induit dépendent de la charge mécanique appliquée sur l'arbre du moteur.

Relation correspondante :  $U = E + R I$

En multipliant par  $I$ , on obtient :

$U.I$	$=$	$E.I$	$+$	$R.I^2$
<i>Puissance absorbée dans l'induit</i>		<i>Puissance électromagnétique</i>		<i>Pertes par effet joule dans l'induit</i>

De plus, le rotor (matériau ferromagnétique) est en mouvement dans un champ magnétique, d'où l'apparition de pertes magnétiques notée  $p_{\text{fer}}$ . D'autre part, le rotor en rotation sera le siège de pertes mécaniques notées  $p_{\text{méca}}$ . Ces différentes pertes sont pratiquement **constantes** et nommées **pertes collectives** :  $p_{\text{coll}} = p_{\text{fer}} + p_{\text{méca}}$ .

On définit alors le **couple de pertes** :

$$C_p = \frac{p_{\text{coll}}}{\Omega}$$

En résumé : Le moteur absorbe une certaine puissance **électrique** en entrée, et fournit une puissance **mécanique** en sortie. On note  $P_a$  la puissance électrique absorbée et  $P_u$  la puissance utile fournie.

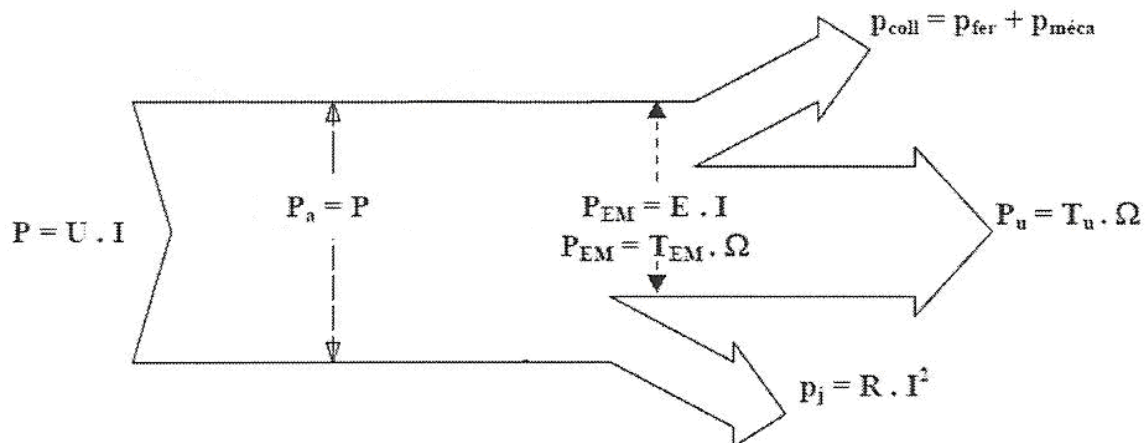


Figure 13 : Bilan des puissances pour un moteur à aimants permanents

$U$  : tension d'alimentation de l'induit

$I$  : Intensité du courant d'induit

$P$  : puissance absorbée par l'induit (électrique)



$P_a$  : puissance totale absorbée par le moteur ( $P_a = P$ )

$P_{EM}$  : puissance électromagnétique

$E$  : f.é.m. (ou f.c.é.m.) de l'induit

$T_{EM}$  ou  $C_{EM}$  : moment du couple électromagnétique

$\Omega$  : vitesse angulaire de l'arbre moteur

$p_j$  : pertes par effet Joule dans l'induit

$p_{coll}$  : pertes "constantes" ou "collectives" (pertes magnétiques + pertes mécaniques)

$P_u$  : puissance utile fournie par le moteur (mécanique)

$T_u$  ou  $C_u$  : moment du couple utile

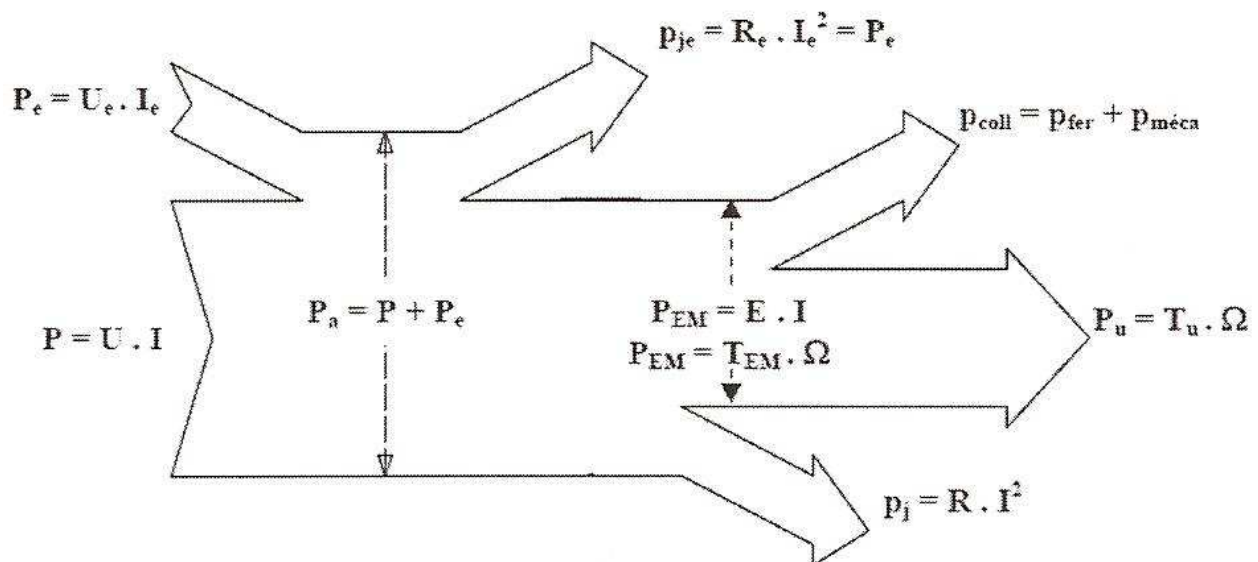


Figure 14 : Bilan des puissances pour un moteur à bobinage

$P_e$  : puissance absorbée par l'inducteur (électrique)

$P_a$  : puissance totale absorbée par le moteur ( $P_a = P + P_e$ )

$P_{je}$  : pertes par effet Joule dans l'inducteur

### Remarques :

- Dans le cas d'un moteur à bobinage, toute la puissance absorbée par l'inducteur ( $P_e$ ) est convertie en pertes par effet Joule ( $p_{je}$ ).
- Les pertes magnétiques notée  $p_{fer}$  sont très souvent négligées. Les pertes "constantes" ou "collectives" se limitent alors aux seules pertes mécaniques  $p_{méca}$ .

Le **rendement** du moteur à courant continu, noté  $\eta$  (lettre grec êta) est défini comme étant le rapport de la puissance utile de sortie  $P_u$  sur la puissance absorbée d'entrée  $P_a$  :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Comme le rendement est égal au rapport de deux mêmes grandeurs, il n'a pas d'**unité**.