

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).

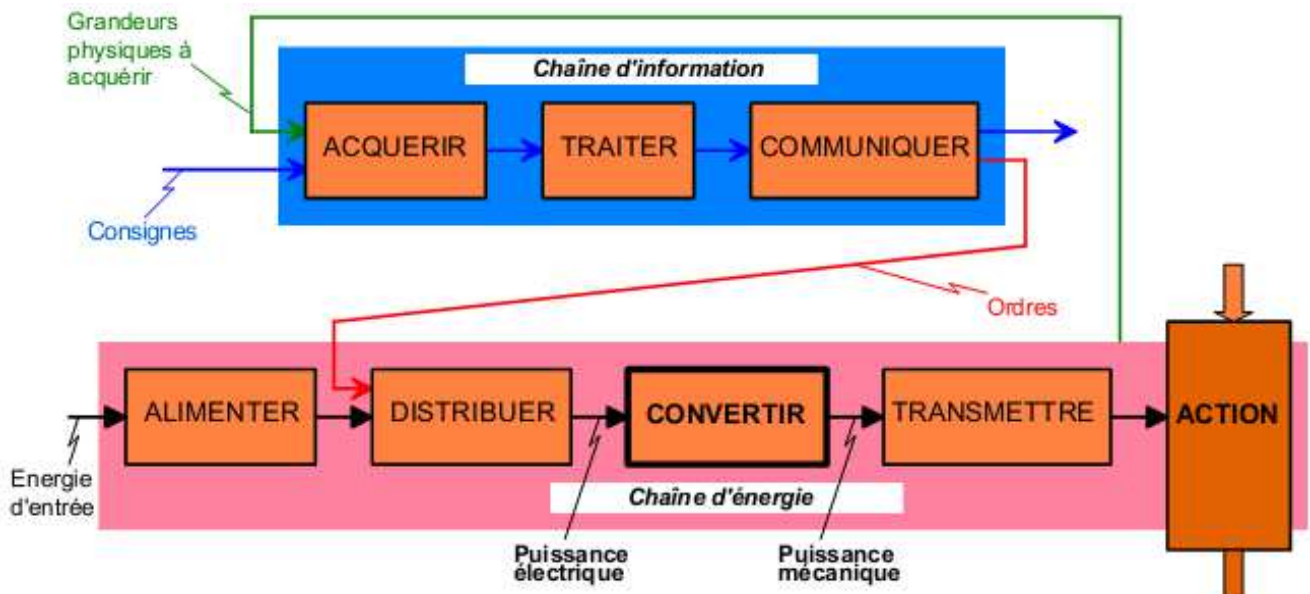


Figure 1 : Structure fonctionnelle globale d'un système

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).

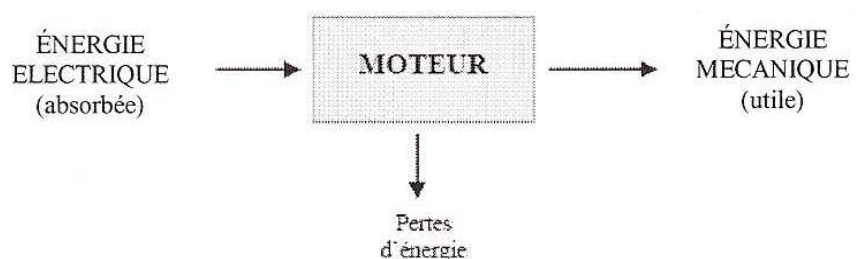
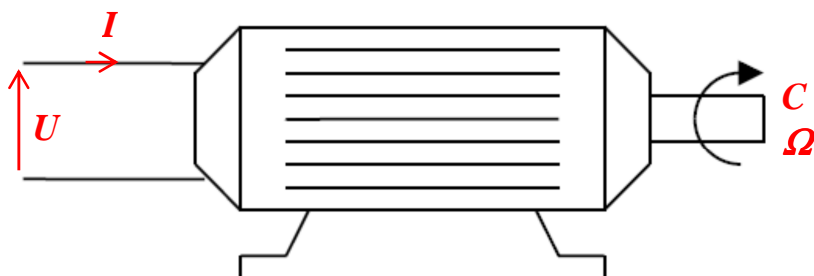


Figure 2 : Le moteur à courant continu

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** Ω [rad.s⁻¹] (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>
Grandeurs d'entrée	U	Tension continue ou unidirectionnelle aux bornes du moteur	Volt	V
	I	Courant continu traversant le moteur	Ampère	A
Grandeurs de sortie	C ou C_u	Couple utile délivré par l'arbre moteur	Newton.mètre	N.m
	Ω	Vitesse angulaire de rotation de l'arbre moteur	Radian par seconde	rad.s⁻¹



Attention



La vitesse angulaire de rotation du moteur, notée Ω , 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.

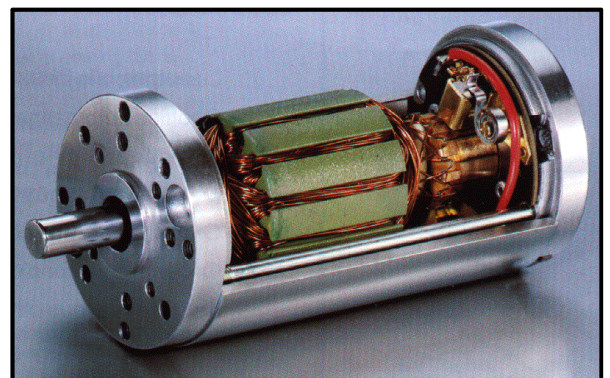
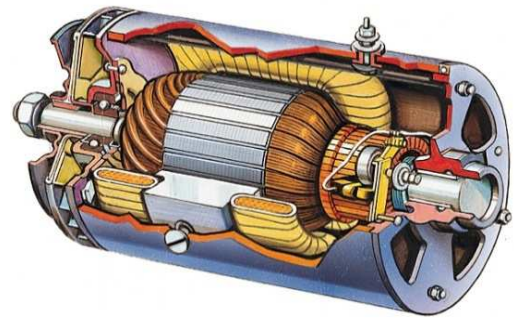
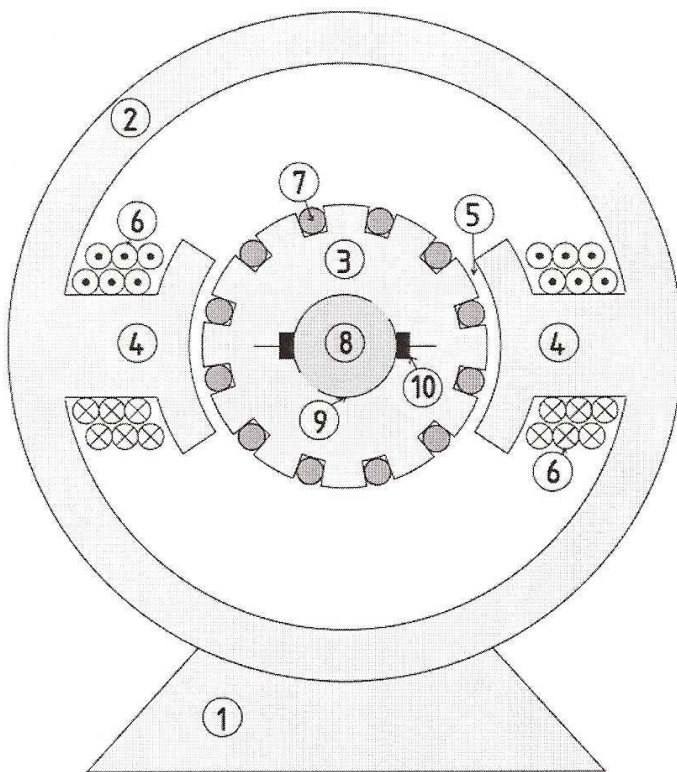
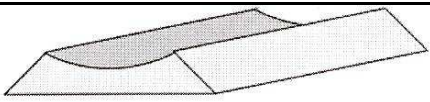
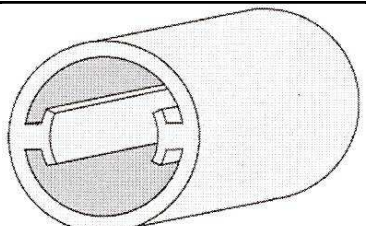


Figure 4 : Constitution du moteur à courant continu

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

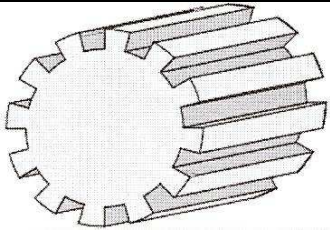
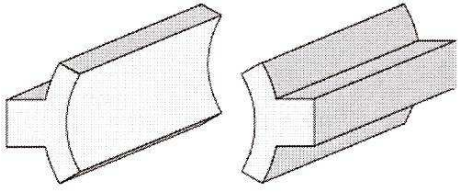
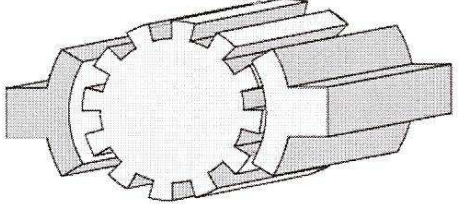
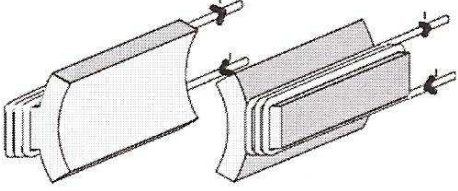
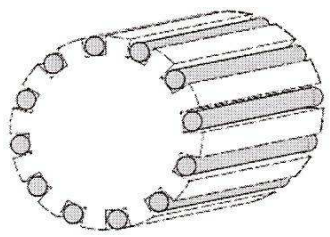
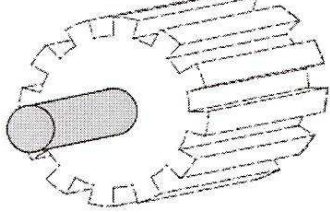
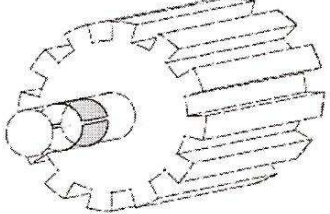
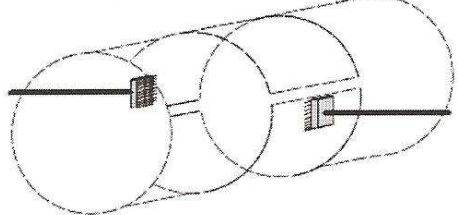
③		Rotor	Partie tournante du circuit magnétique du moteur conçue en matériau ferromagnétique.
④		Pôles du stator	Partie du stator permettant de fournir dans l'entrefer un champ magnétique radial (dirigé vers le centre du rotor). Leur nombre est toujours pair.
⑤		Entrefer	Espace séparant le stator du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

Tableau 1

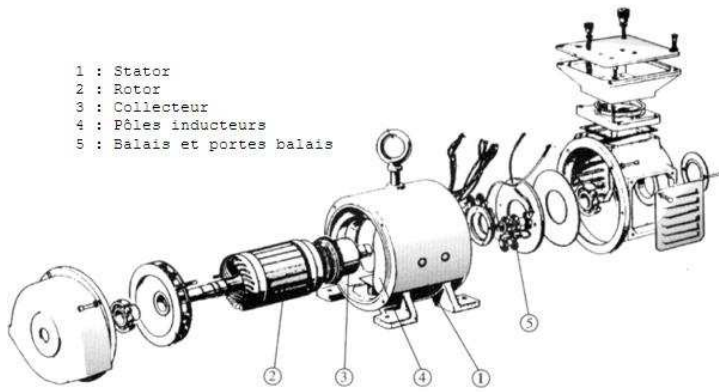


Figure 5 : Vue éclatée du moteur à courant continu

4.2. L'inducteur 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 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**.

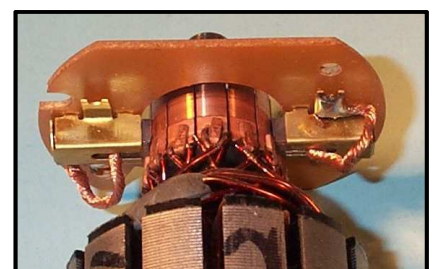


Ce **bobinage induit** est parcouru par un courant continu fixe et perpendiculaire au champ magnétique. Ce courant est imposé par une alimentation.

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**.

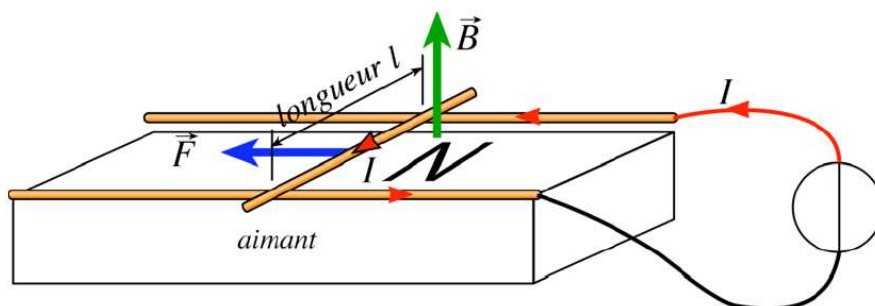
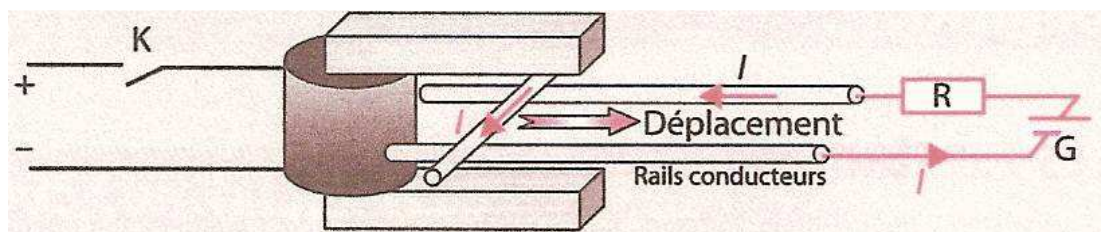


Figure 8 : La force de Laplace est à l'origine du déplacement de l'élément conducteur sur les deux rails.

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 :

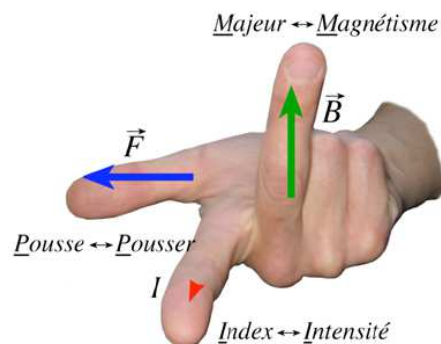


Figure 9 : Force électromagnétique et règle de la main droite

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

B : induction magnétique en tesla [T]
 I : intensité du courant en ampère [A]
 l : longueur du conducteur en mètre [m]
 α : angle formé entre le conducteur et le vecteur induction
 F : force en newton (N)

Notons que si :

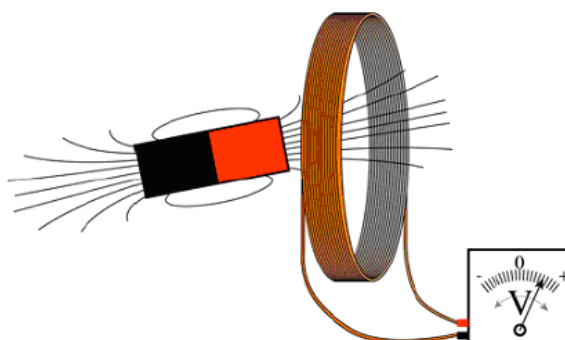
- le conducteur est parallèle au vecteur induction, la force de Laplace est **nulle**.
- le conducteur est perpendiculaire au vecteur induction : $\alpha = 90^\circ$ et $\sin\alpha = 1$, la force de Laplace est alors obtenu par la formule : **$F = B.I.l$**

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).

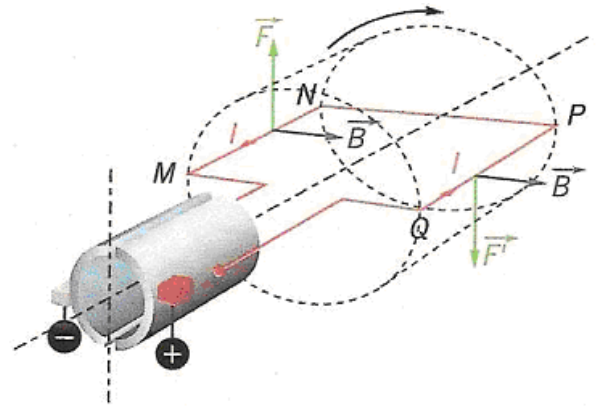


Figure 11

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 $[V / Wb \cdot rad \cdot s^{-1}]$

Φ : flux utile du champ magnétique sous un pôle en Webers [Wb]

Ω : 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 :

- ① Par des **aimants permanents**. Dans ce cas le flux inducteur est **constant** et ne peut être modifié.
- ② 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 Φ peut-être modifié.

Si le moteur fonctionne à flux constant :

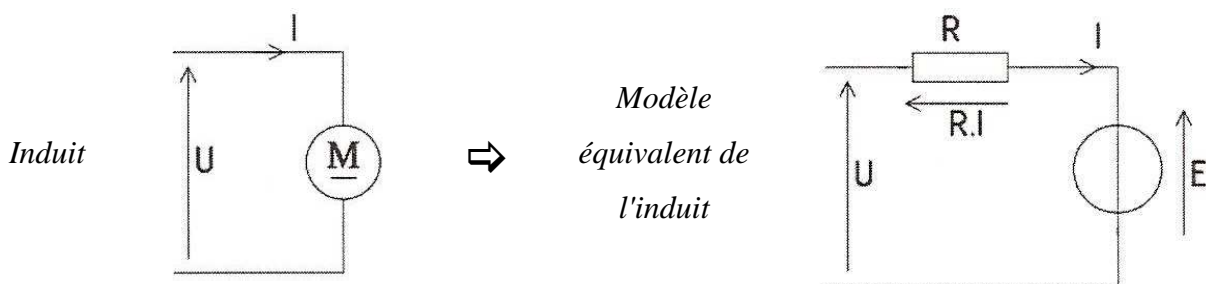
$E = K.\Omega$	<p>E : force électromotrice en volt [V]</p> <p>K : constante liée à la structure du moteur et dépendant de ses caractéristiques de construction en [V / rad.s⁻¹] ($K = K'.\Phi$)</p> <p>Ω : vitesse angulaire en radian par seconde [rad.s⁻¹]</p>
----------------	--

⇒ 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 [Ω] ; 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**.

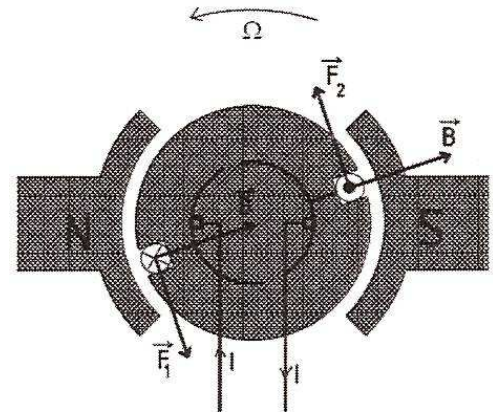


Figure 12 : Couple de force \vec{F}_1 et \vec{F}_2

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 Ω , elle peut aussi s'écrire :

$$P_{EM} = C_{EM} \cdot \Omega$$

C_{EM} : moment du couple électromagnétique produit en newton.mètre [$N.m$]
 Ω : 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 $P_{EM} = C_{EM} \cdot \Omega = E \cdot I$ donc $C_{EM} = \frac{E \cdot I}{\Omega}$

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

Le moment du couple électromagnétique peut donc s'exprimer :

$$C_{EM} = K \cdot I$$

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 η 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 :

	$U \cdot I$	=	$E \cdot I$	+	$R \cdot I^2$
	<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_{fer} . D'autre part, le rotor en rotation sera le siège de pertes mécaniques notées $p_{méca}$. Ces différentes pertes sont pratiquement **constantes** et nommées **pertes collectives** : $p_{coll} = p_{fer} + p_{méca}$.

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

$$C_p = \frac{P_{coll}}{\Omega}$$

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.

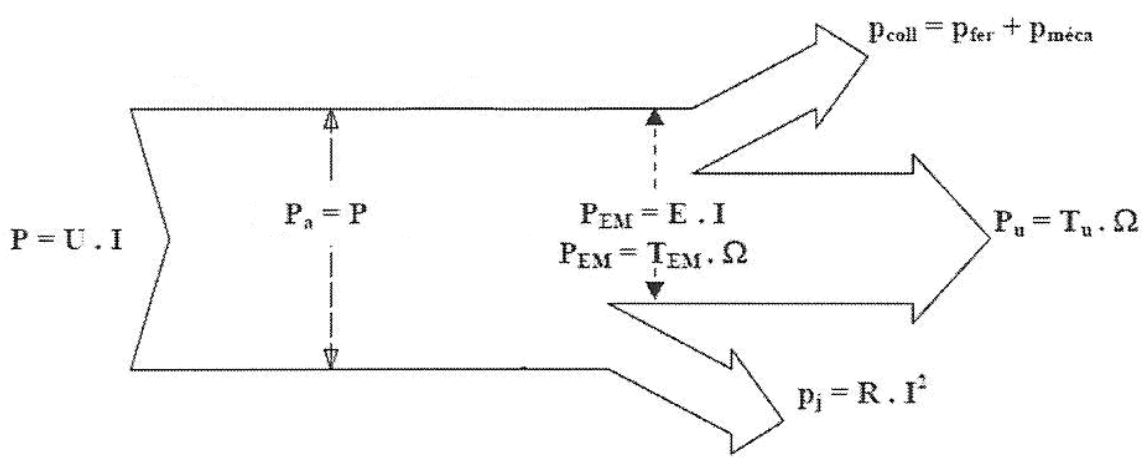


Figure 13 : Bilan des puissances pour un moteur à aimants permanents

- 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

Ω : 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

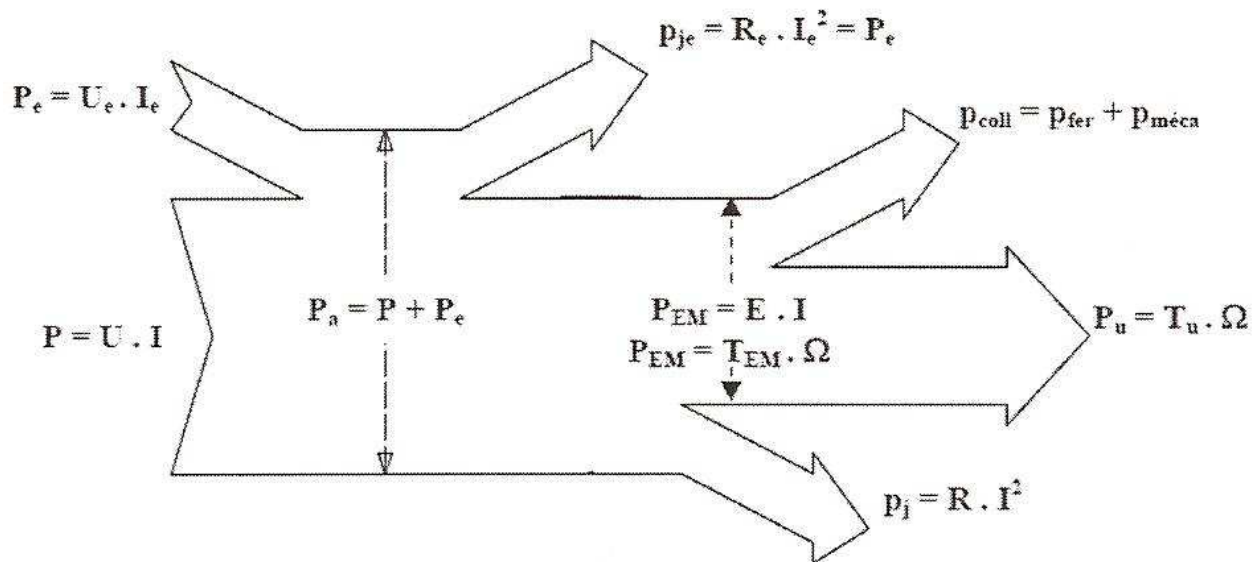


Figure 14 : Bilan des puissances pour un moteur à bobinage

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 η (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**.