

# **CHAPITRE 4: MACHINE A COURANT CONTINU**



# RAPPEL

## Quatre lois déterminent le système électromécanique

1. La loi de **Faraday** : si la vitesse du conducteur est  $v$

Il apparaît une f.é.m.  $E$  :  $E = Blv$

2. La loi de **Laplace** : si le courant dans le conducteur est  $I$

Il existe une force électromagnétique :  $F_{em} = BIl$

3. La loi d'**Ohm** :  $U = E + RI$

4. La loi de la **dynamique** : si la vitesse  $v$  est constante, elle implique :  $F_{em} = F_{mec}$

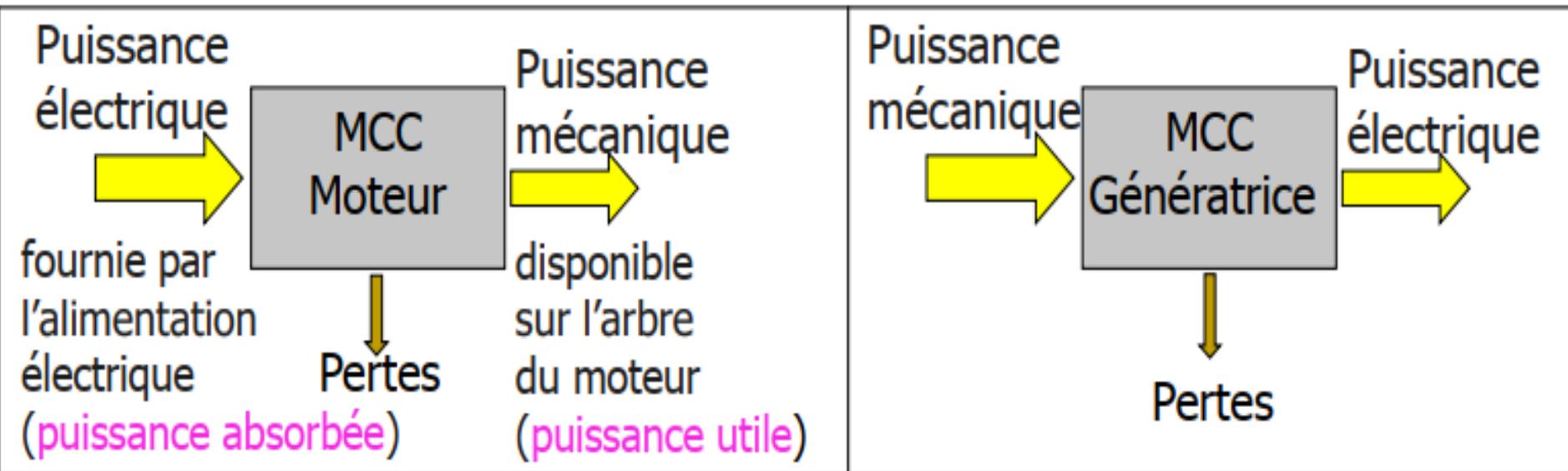
Le fonctionnement sera **moteur** si  $F_{em}$  et  $v$  sont de même sens  $U = E + RI$

Le fonctionnement sera **générateur** électrique si  $F_{em}$  et  $v$  sont de sens opposé. La f.é.m.  $E$  va dans le sens du courant  $U = E - RI$

## La puissance

$$P_{em} = F_{em} \times v = B \times l \times I \times \frac{E}{B \times l} = EI$$

- Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie électromécanique réversible. En fonctionnement moteur, elle permet de produire de l'énergie mécanique à partir d'énergie électrique ; en fonctionnement génératrice c'est l'inverse:

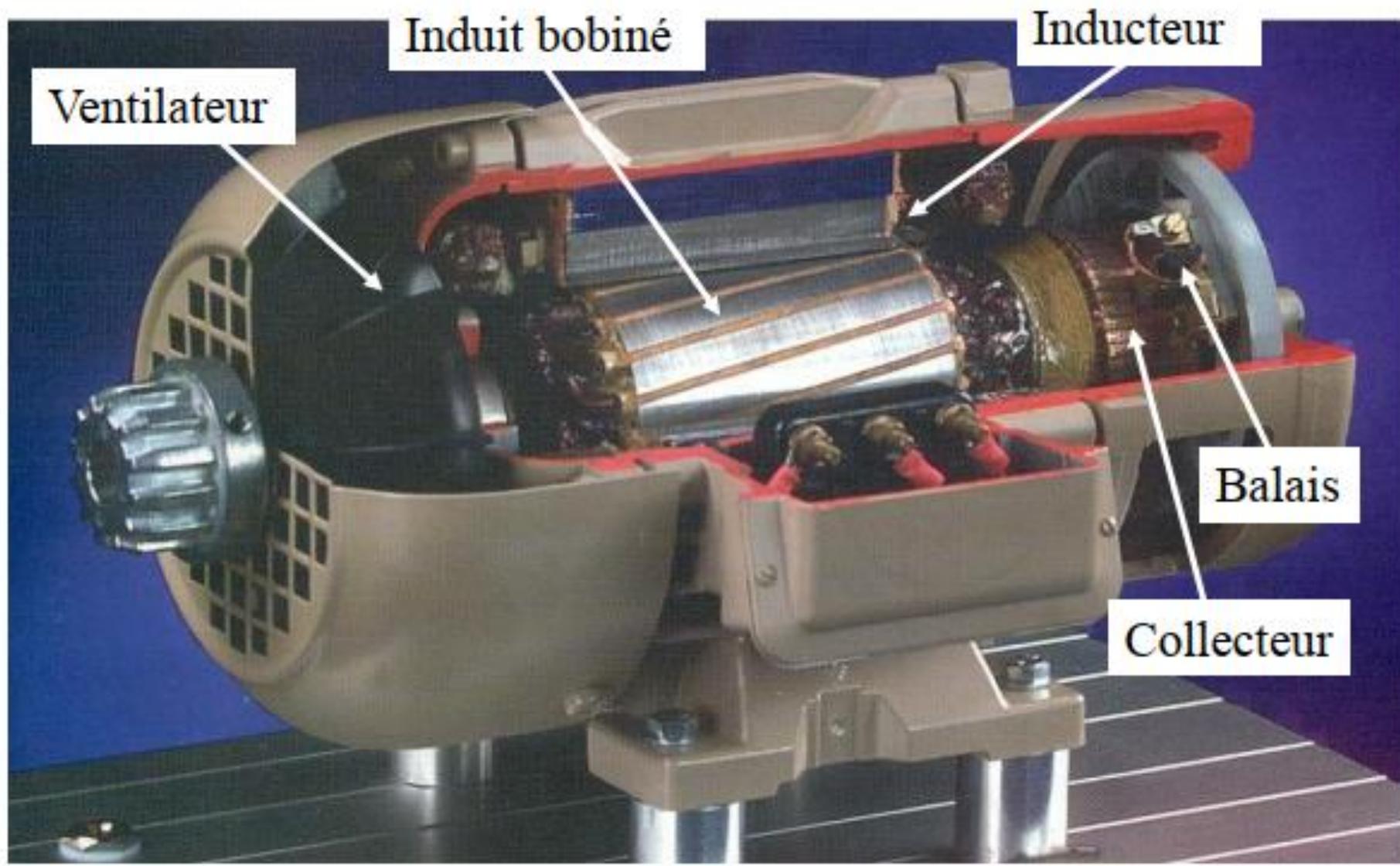


Les moteurs à courant continu restent très utilisés:

- Dans le cas de faibles puissances: industrie automobile (essuie-glace, ventilateurs, lève-vitre, démarreur, etc.), la robotique, ainsi dans l'électroménager et l'outillage.
- Dans le cas de moyennes puissance: engin de levage (treuils, grues, etc.)
- Dans le cas de grandes puissances: traction électrique (train).

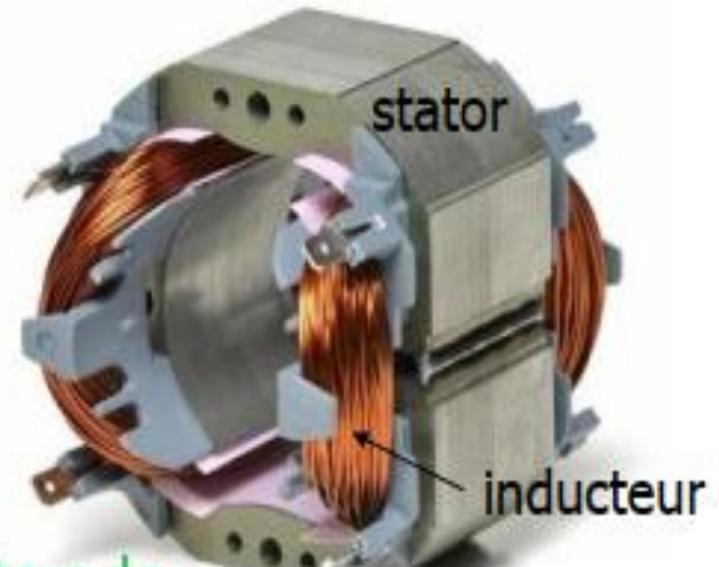
Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbons

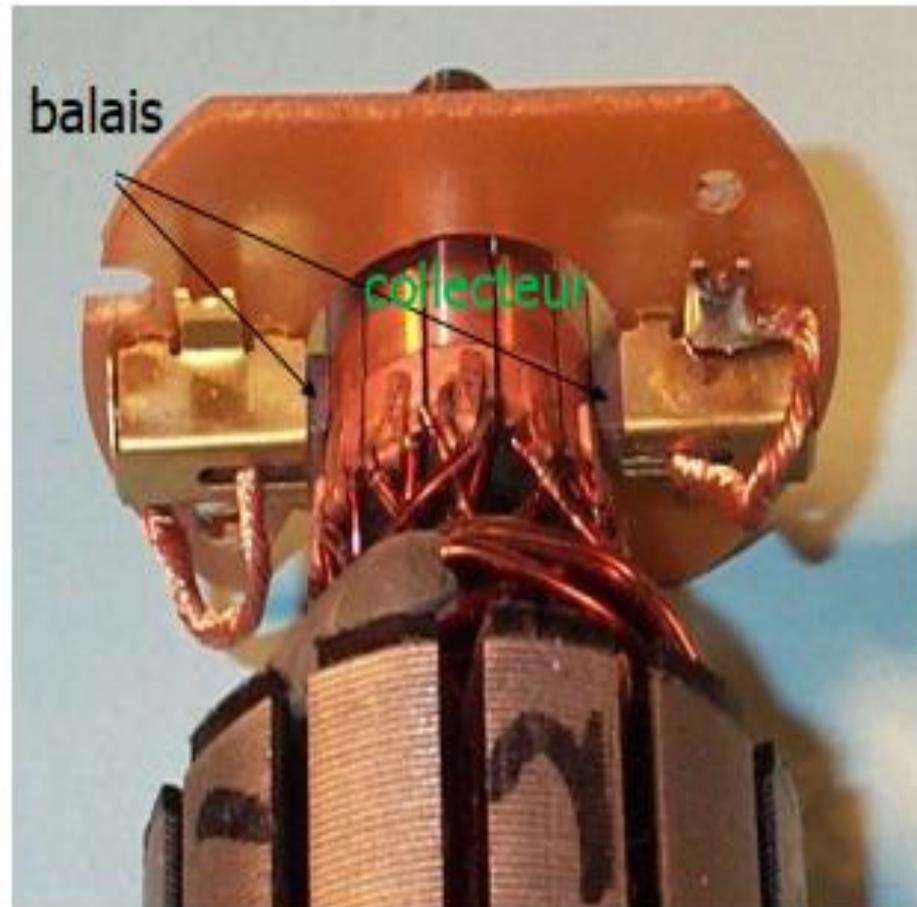
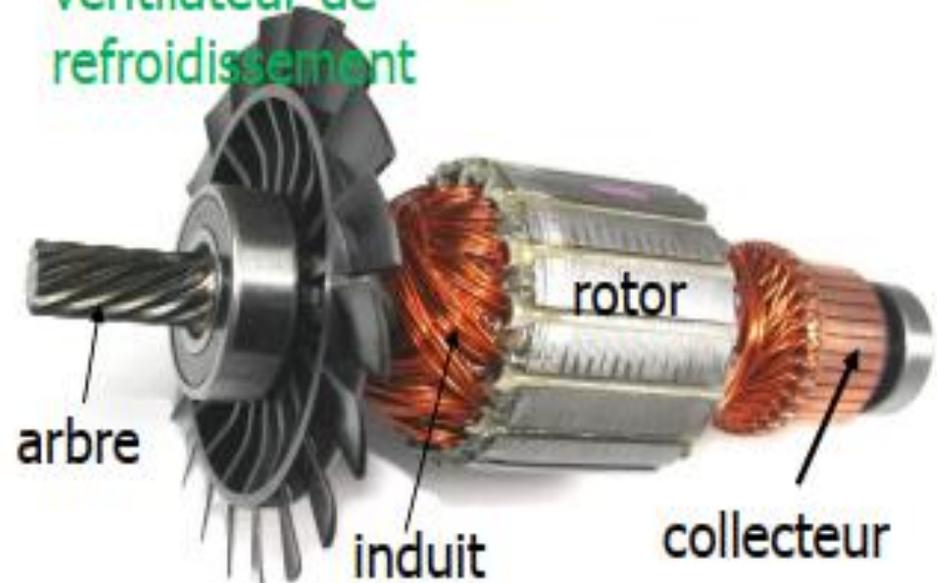


Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

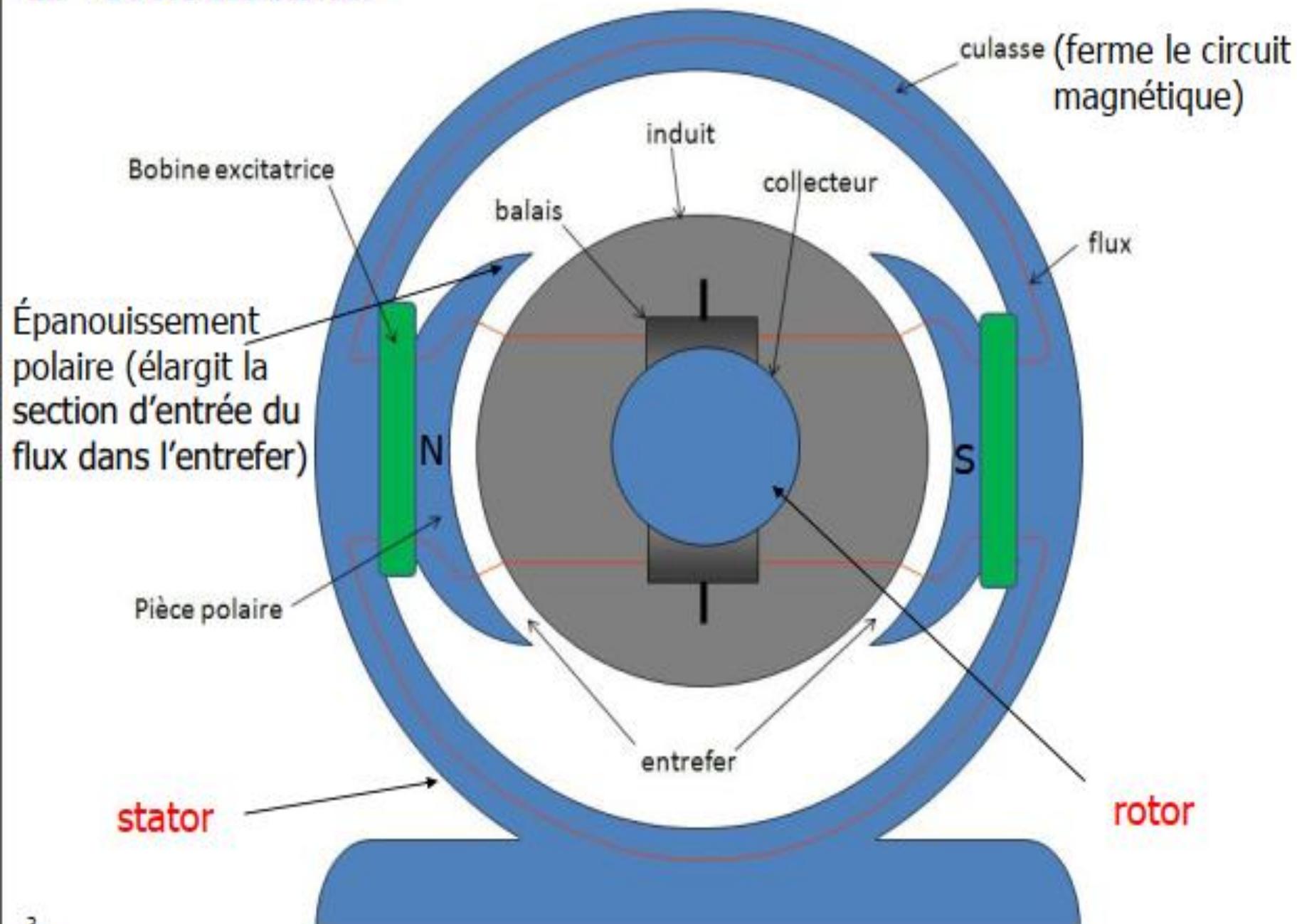
- Le stator (inducteur) ;
- Le rotor (induit) ;
- Le collecteur ;
- Les balais également appelés charbons.



ventilateur de refroidissement



# 1. Constituant:



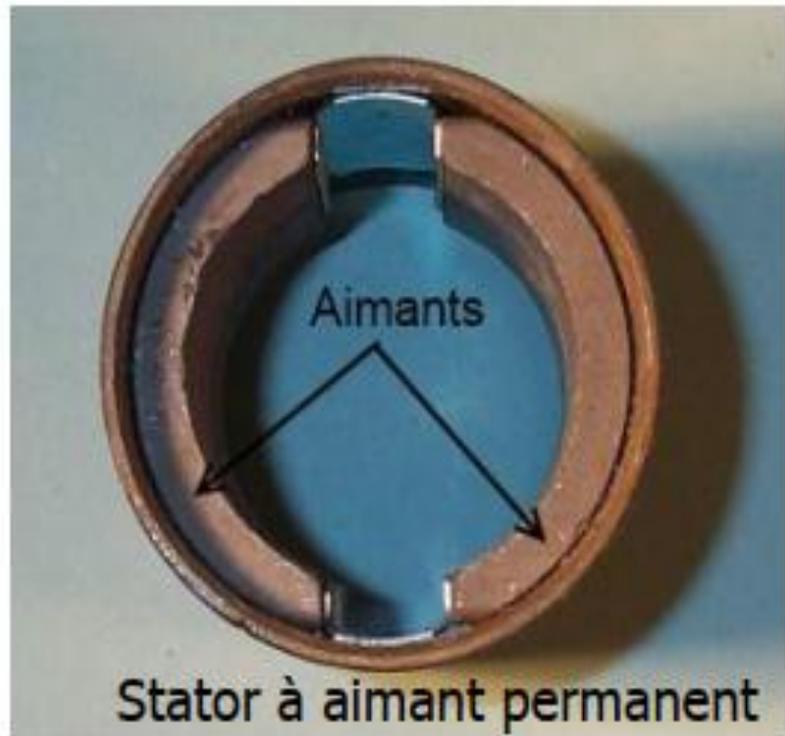
## ❑ Le stator

**Le stator** est la partie fixe: constitué d'un circuit magnétique portant l'enroulement d'excitation parcouru par un courant continu (ou des aimants permanents), dont le rôle est de créer un flux magnétique dans l'entrefer.



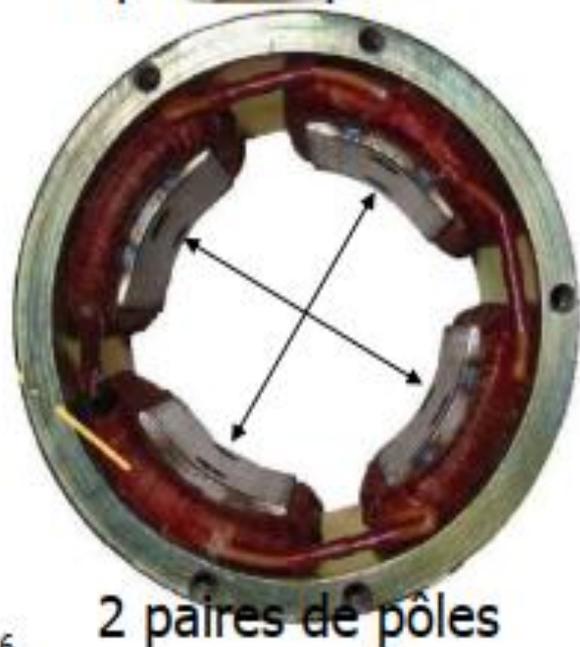
### Stator à enroulement et pièces polaires

- La variation de l'excitation peut rendre possible la variation de la vitesse de la machine



- Avantages: Pertes joules supprimées;
- Inconvénients: en industrie, le coût de l'aimant limite son utilisation;
- Limites: le champ magnétique est fixe; impossibilité d'exploiter sa variation.

Dans une machine à courant continu, le stator est constitué de plusieurs paires de pôles magnétiques. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.



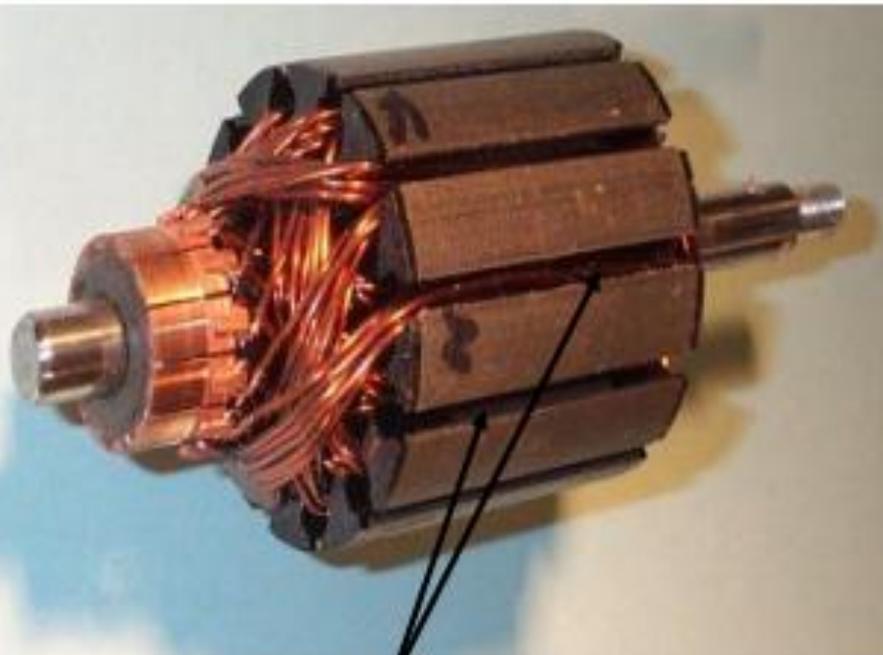
l'inducteur comporte un nombre de paire de pôles, successivement Nord, Sud,...

Lignes de champ magnétique



## ❑ Le rotor:

**Le rotor** est la partie tournante: formé d'un empilage de tôles magnétiques, comprenant un certain nombre d'encoches, sur lesquelles sont placés un certain nombre de bobinages. Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant continu absorbé (moteur) ou débité (génératrice) par la machine.



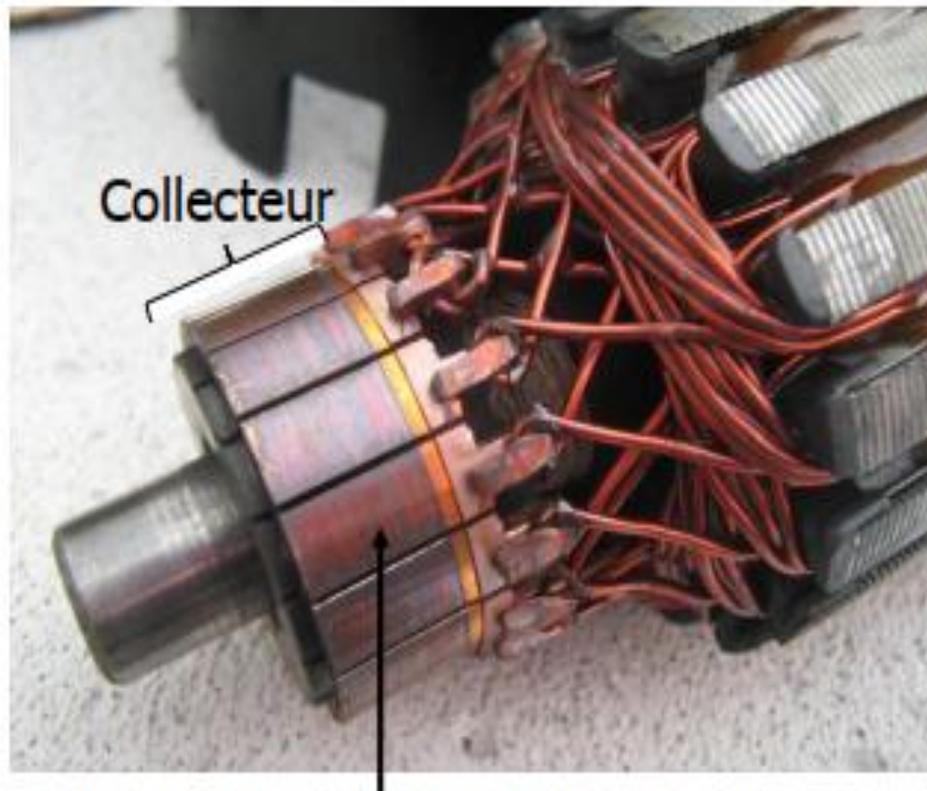
Encoches pour logement des conducteurs dits actifs (parallèle à l'arbre)



Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches et soudure de ceux-ci sur le collecteur

## ❑ Le collecteur

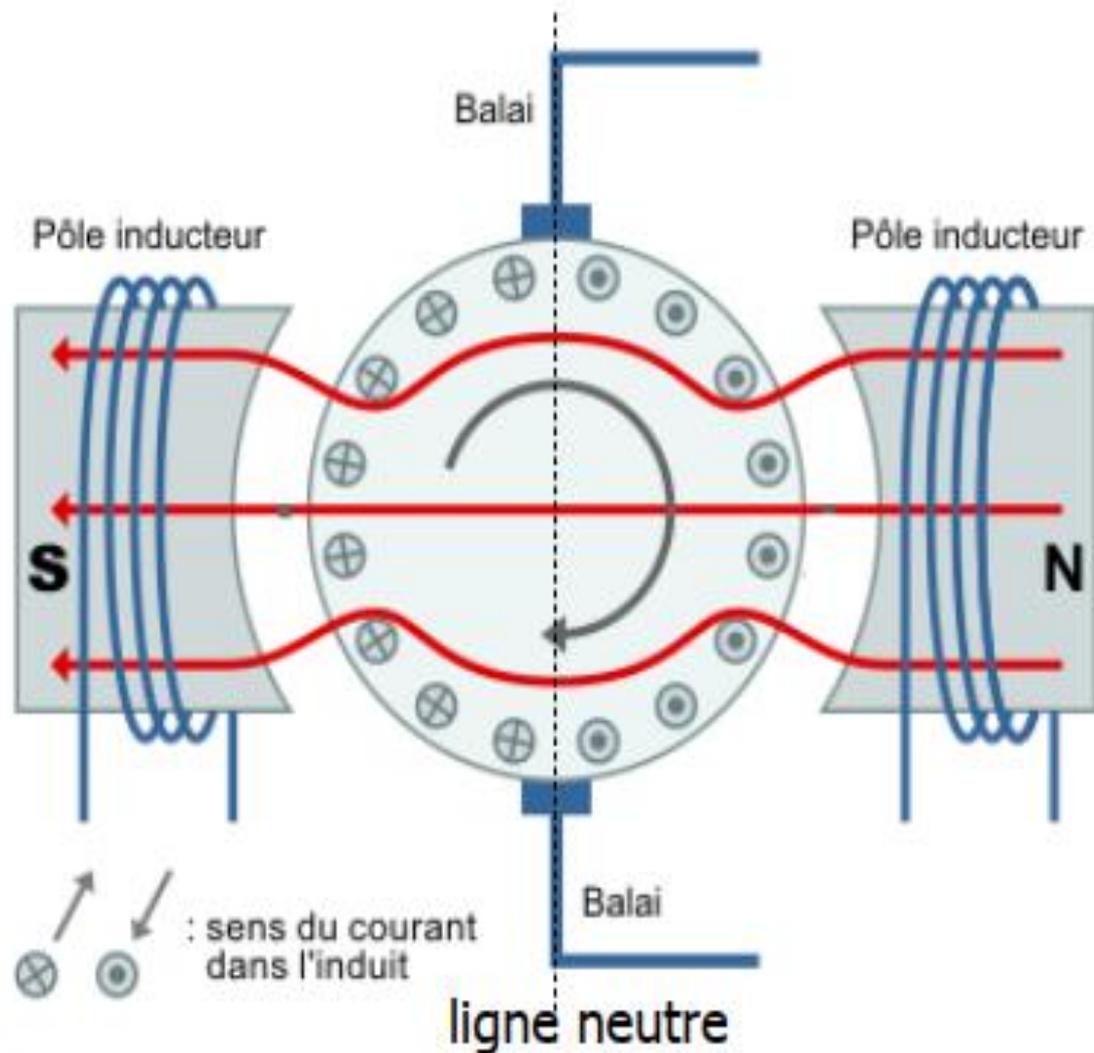
- **le collecteur** est monté sur l'arbre de la machine et fait de lames de cuivre isolés les unes des autres.
- Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.
- Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.



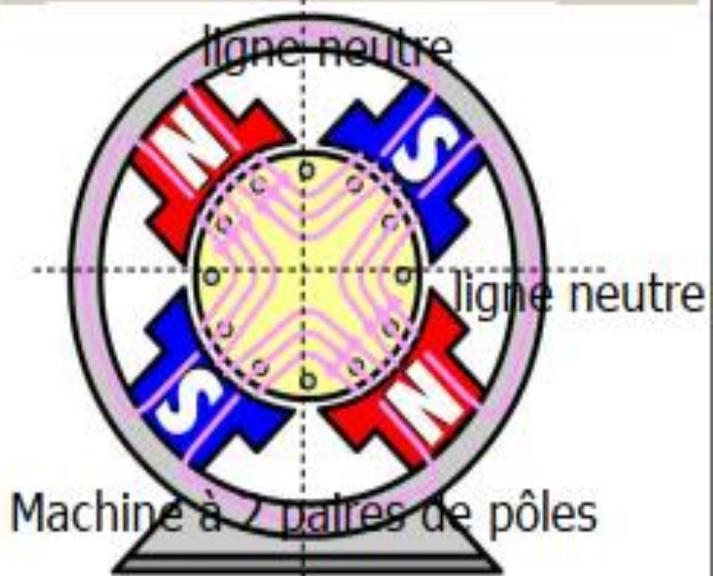
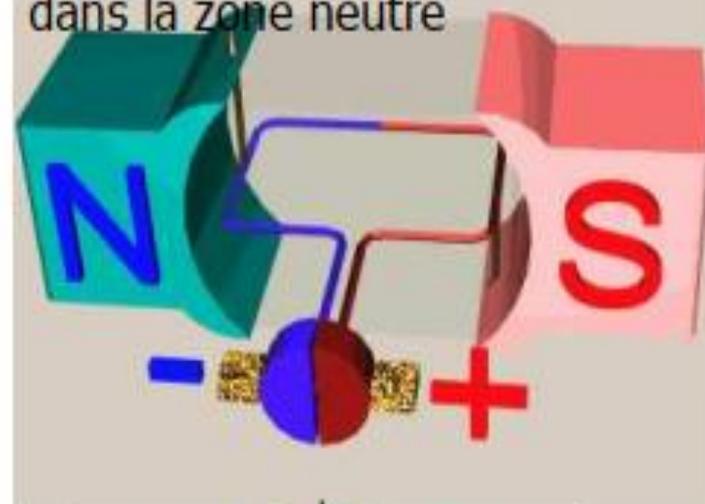
Lames en cuivre du collecteur



- Le collecteur est formé de deux demi-sections (stator bipolaire) qui permettent de changer le sens du courant (commutation) dans les conducteurs lors du franchissement de la ligne neutre (La perpendiculaire à l'axe des pôles d'une machine bipolaire).

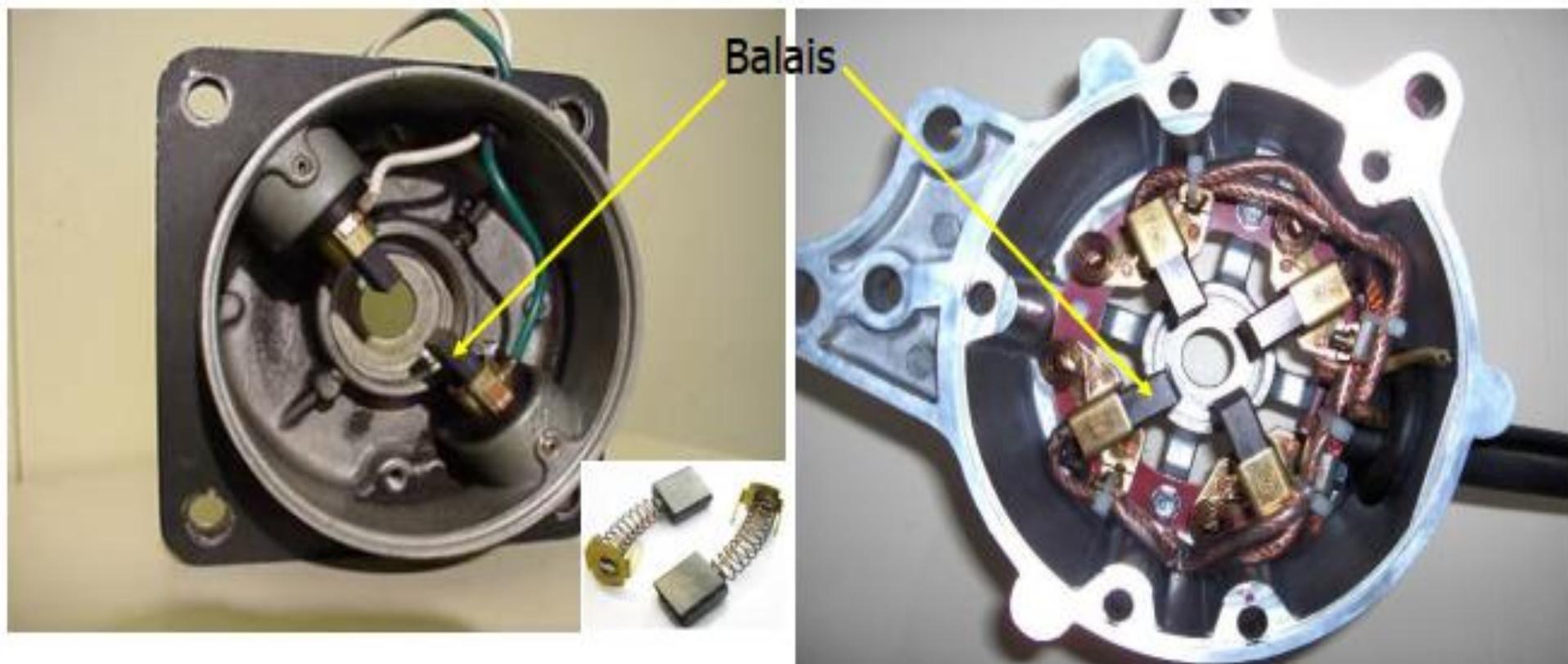


Commutation du courant d'induit dans la zone neutre



## ❑ Les balais

- **les balais** faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement.
- Les balais solidaires du stator frottent sur le collecteur (contacts glissants), ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.
- Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles.



La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables

- Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est alors nécessaire.

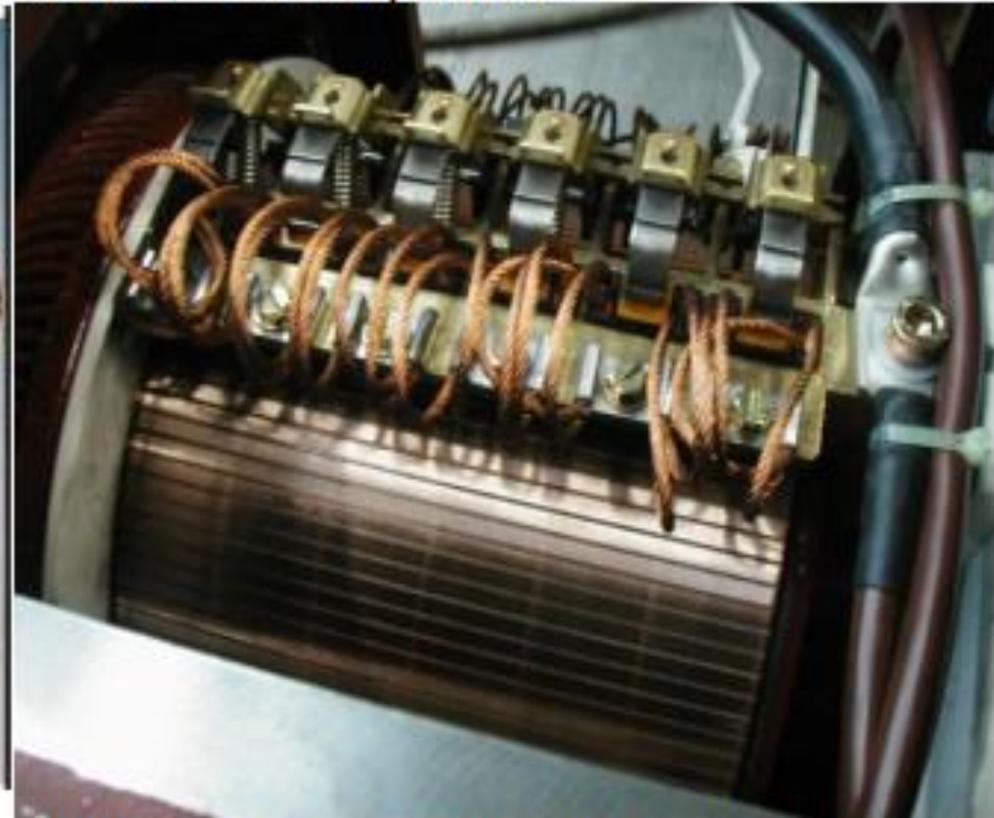
### Remarque:

- Les balais et le collecteur constituent les points faibles de la machine MCC (usure prématurée des balais et collecteur).
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.



Porte balais

Balais d'une machine multipolaire



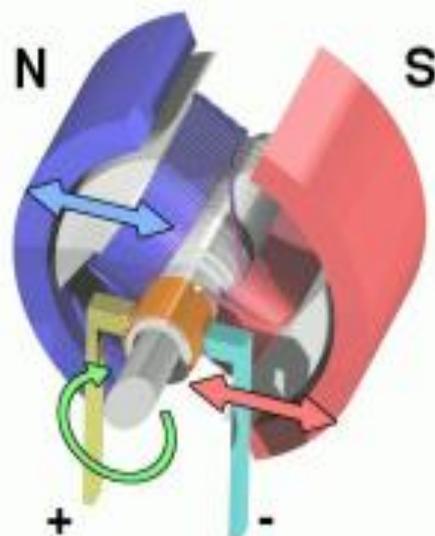
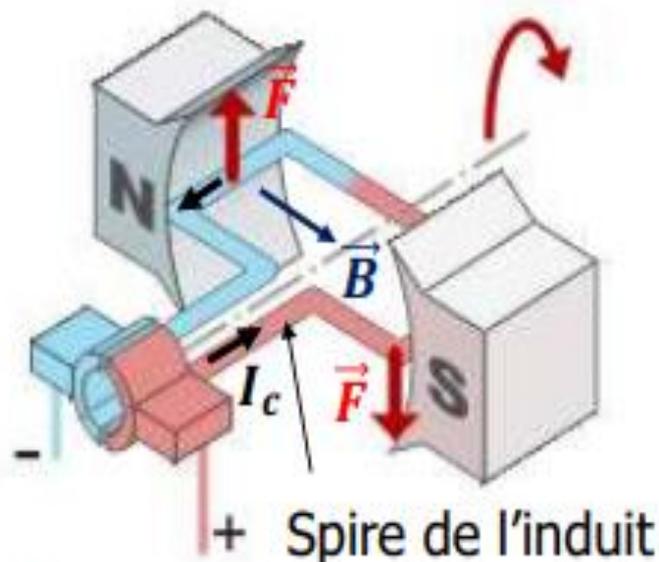
balais d'une machine de forte puissance

## 2. Principe de fonctionnement

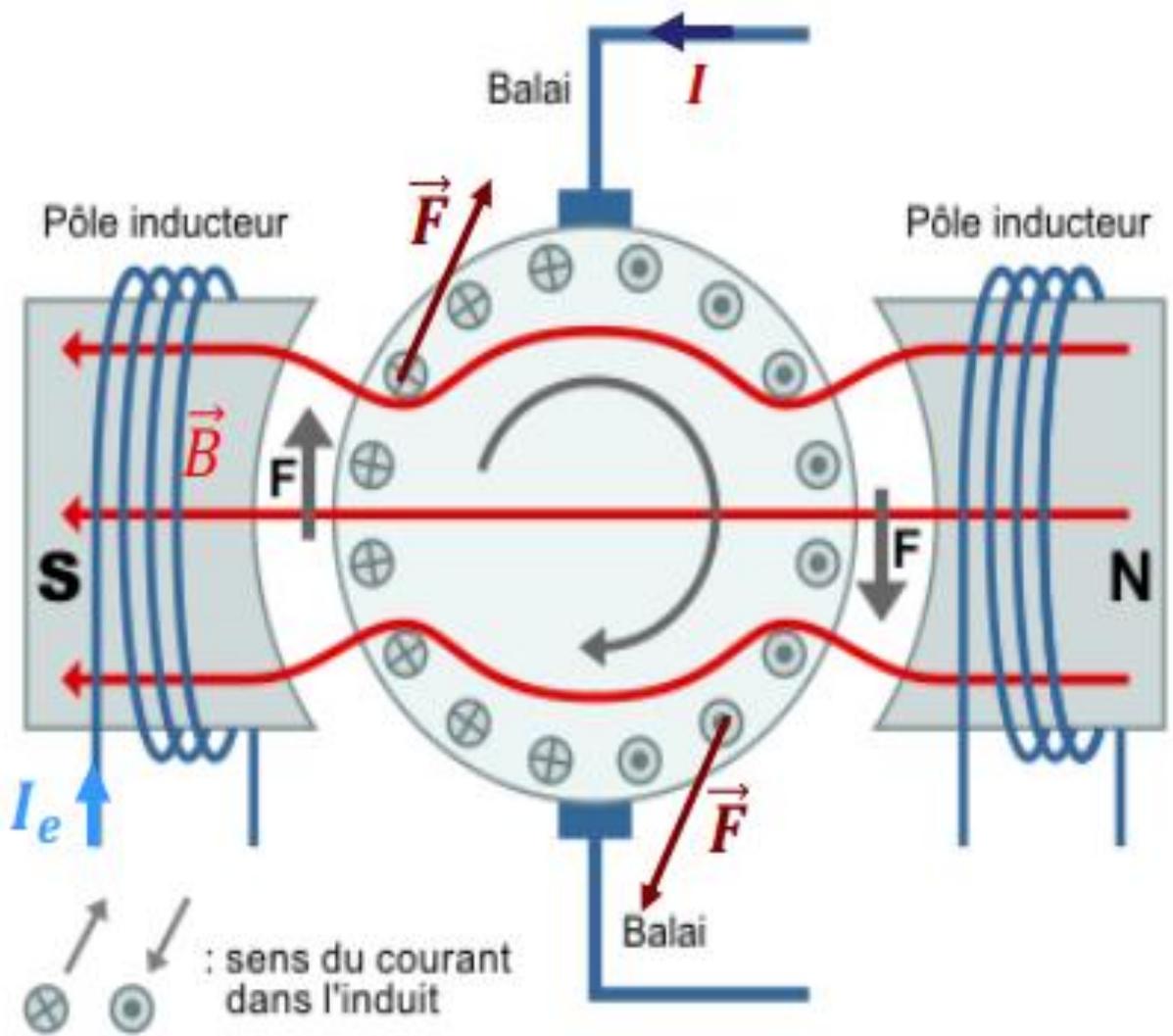
### Loi de Laplace:

Un conducteur traversé par un courant, placé dans un champ magnétique est soumis à une **force de Laplace**.

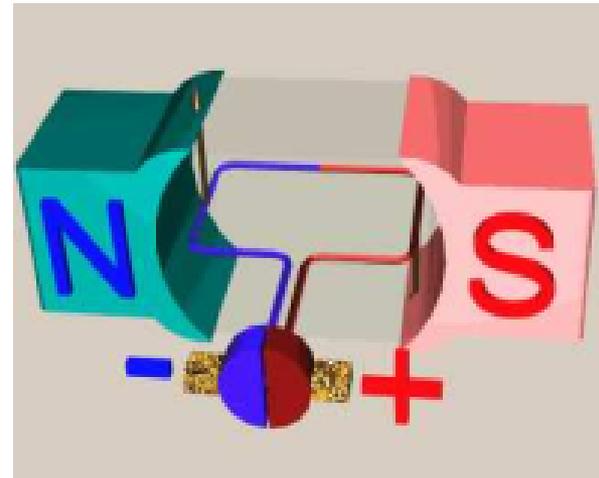
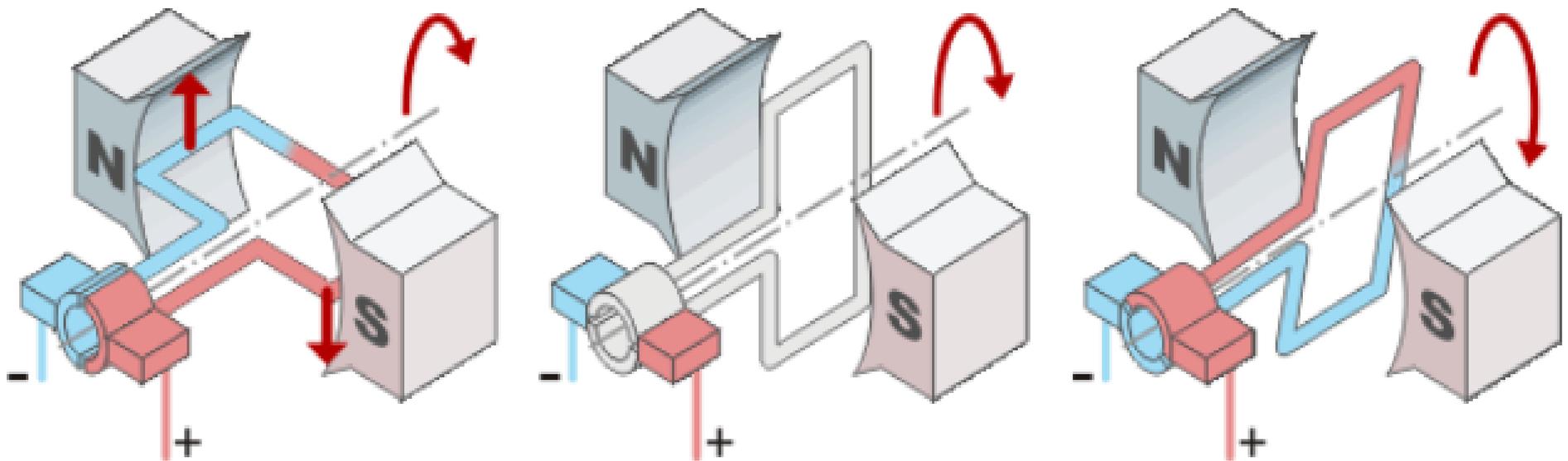
- L'induit est plongé dans le champ magnétique  $\vec{B}$  créé par l'inducteur.
- Par l'intermédiaire des balais et du collecteur, un courant électrique circule dans les enroulements de l'induit par une source continue.
- D'après la loi de Laplace, les conducteurs de l'induit sont soumis à une **force électromagnétique**  $\vec{F} = I_c \vec{\ell} \wedge \vec{B}$ , avec  $\ell$  est la longueur du conducteur actif (largeur d'un pôle inducteur) traversé par le courant  $I_c$ .



- Le bobinage de l'induit est composé de spires réparties sur un cylindre: seuls les conducteurs actifs sont soumis aux forces électromagnétiques.
- La résultante des forces électromagnétiques se traduit par un couple qui fait tourner l'induit de la machine autour de son axe.



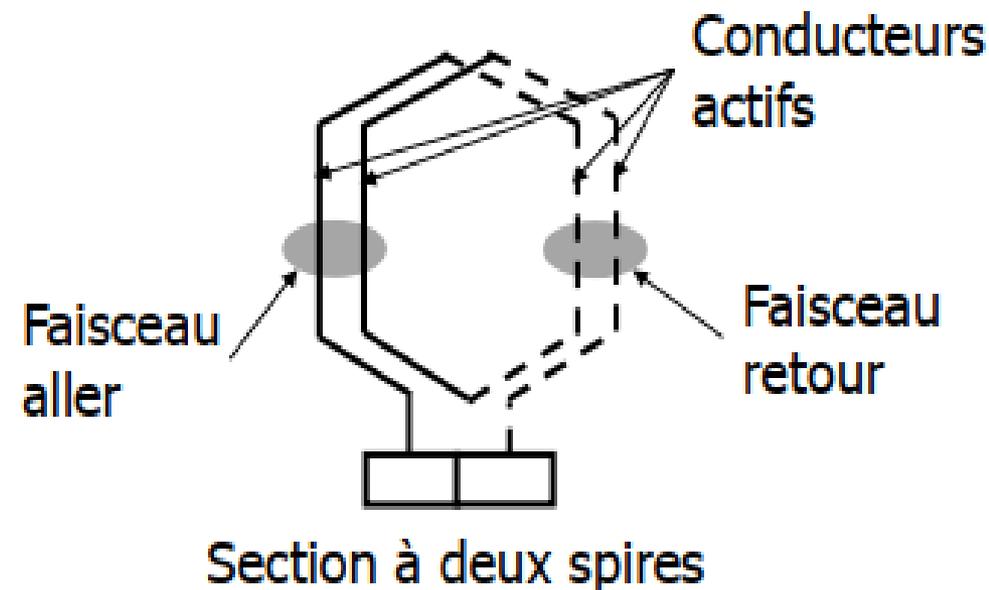
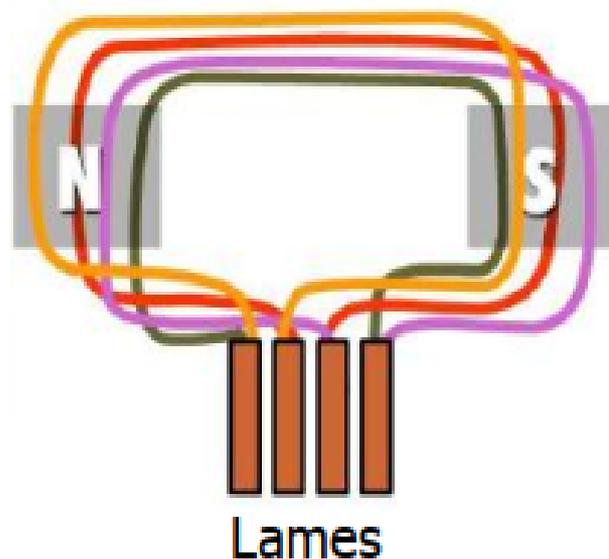
- Le système balais-collecteur a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre), permettant ainsi aux forces d'agir dans le même sens et de poursuivre la rotation du rotor.



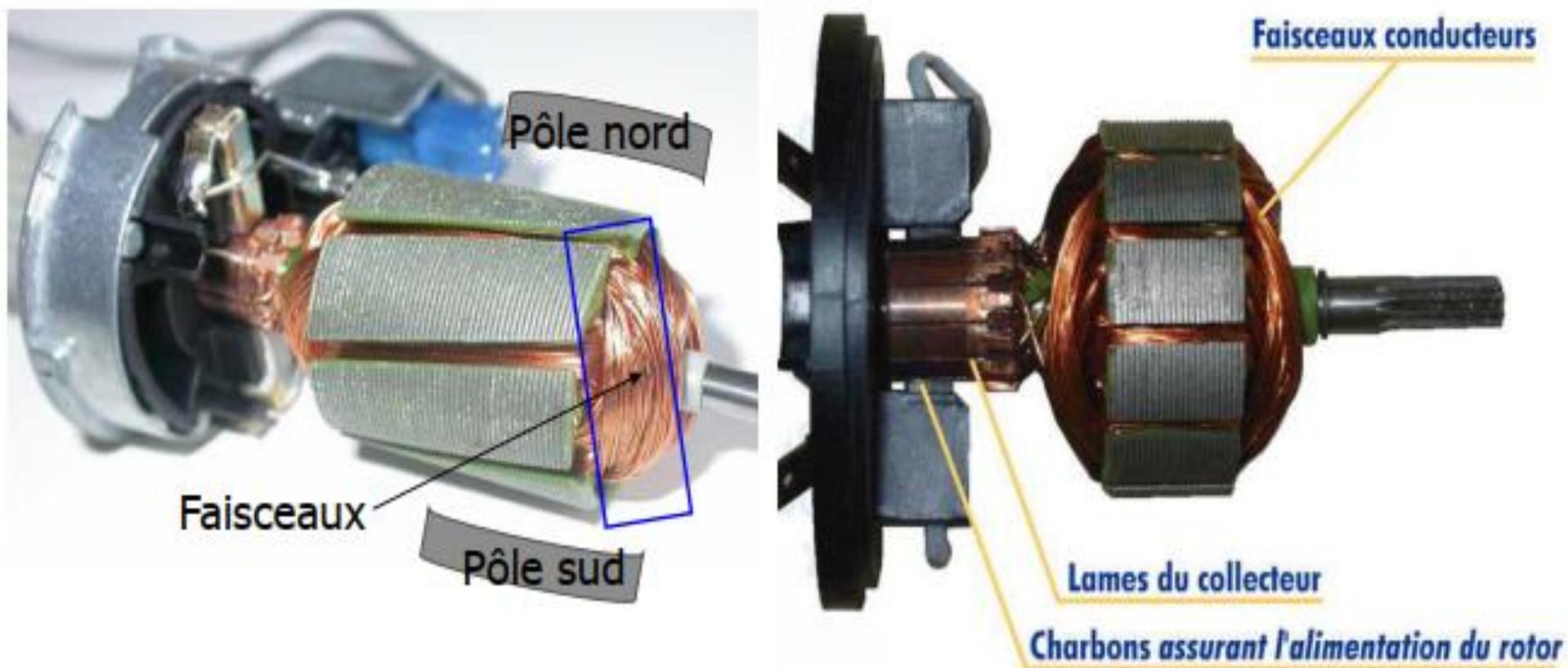
### 3. Bobinage de de l'induit

**Phénomène d'induction:** Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice (f.e.m) induite (loi de Lenz-Faraday).

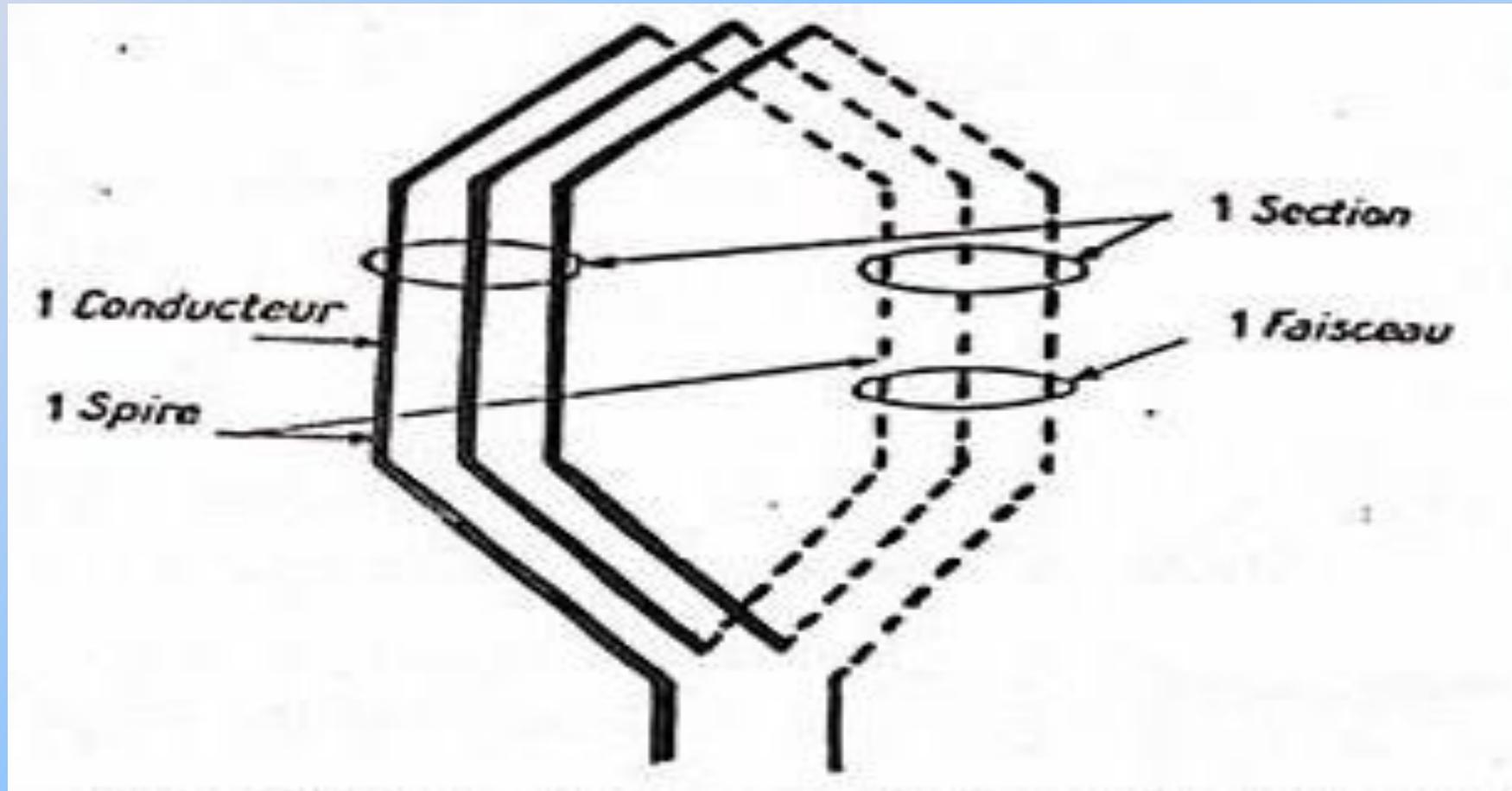
- L'enroulement actif soumis à un couple moteur, est entraîné en rotation dans le flux inducteur (**variation de flux à travers les bobines de l'induit**). Il est donc le siège d'une force contre-électromotrice (f.c.e.m) s'oppose au courant d'alimentation en fonctionnement moteur ou f.e.m en fonctionnement génératrice.
- L'induit est constitué d'un enroulement de spires réunies en faisceaux disposés de telle manière que lorsqu'un coté est soumis au pôle nord, l'autre est au pôle sud.



- Les balais alimentent l'ensemble des faisceaux reliés par les lames du collecteur.
- Les faisceaux aller et retour constituent une section.
- Chaque lame du collecteur est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante.



# 1-Termes utilisés pour la réalisation de schéma de bobinages d'un MCC



**On appelle section un ensemble de spires dont l'entrée et la sortie sont reliées à deux lames du collecteur.**

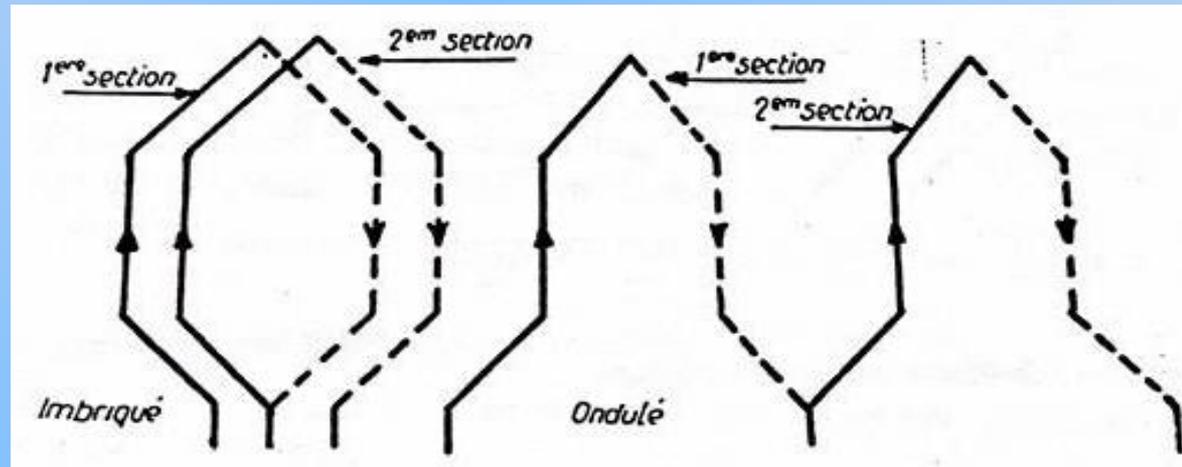
**-Chaque section comprend une ou plusieurs spires**

**-Une spire est formée de deux conducteurs**

**-Chaque section à deux faisceaux, comprenant un ou plusieurs conducteurs.**

## 2- Choix de bobinages

Pour relier entre elles les sections placées sur un induit, on utilise deux procédés:



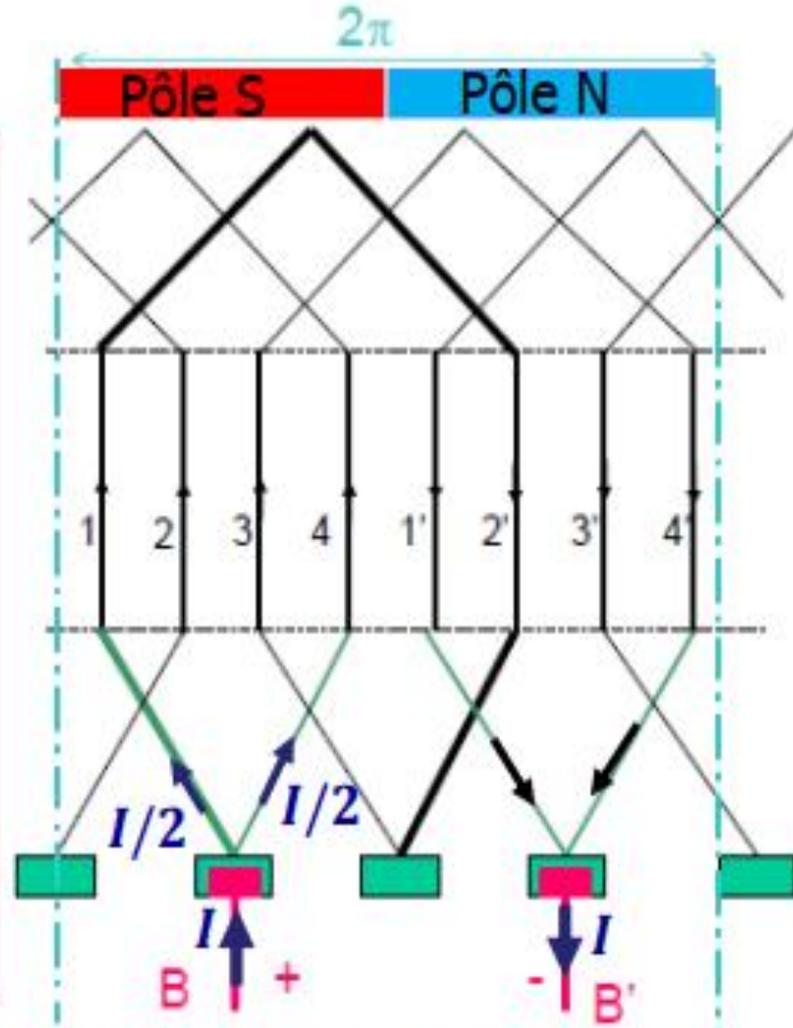
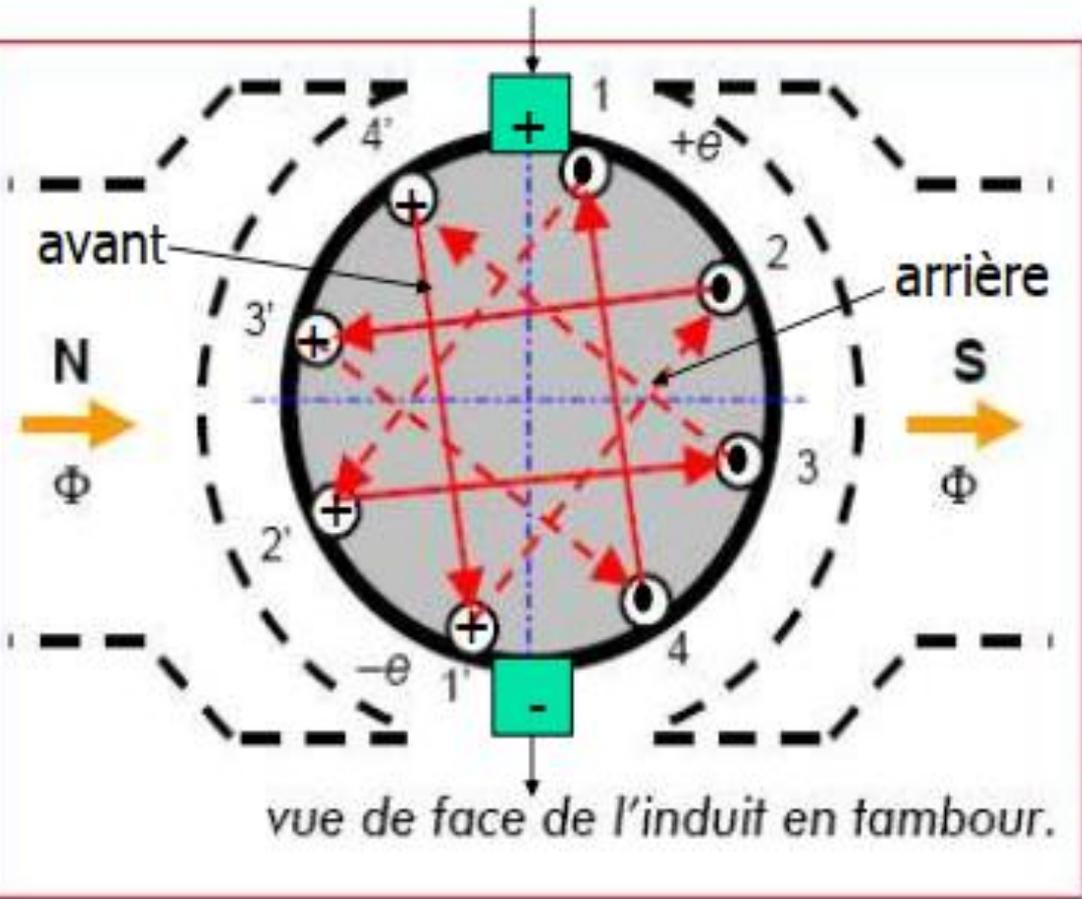
- dans le premier cas (bobinage imbriqué, ou parallèle), les conducteurs reviennent en arrière d'un ou plusieurs pas dentaires.
- dans le deuxième cas (bobinage ondulé, ou série), les conducteurs continuent vers l'avant

Le choix entre ces deux techniques est difficile à détailler simplement ; en général, les petites machines sont toutes à bobinage imbriqué, car l'induit est décomposé en bobines élémentaires qui comportent chacune beaucoup de spires. Mais lorsque des barres sont utilisées pour les grandes puissances, l'ondulation est envisageable. Précisons aussi l'intérêt de bobinage ondulé

Il existe de nombreux procédés de mise en série des conducteurs de l'induit.

**Exemple de réalisation:**

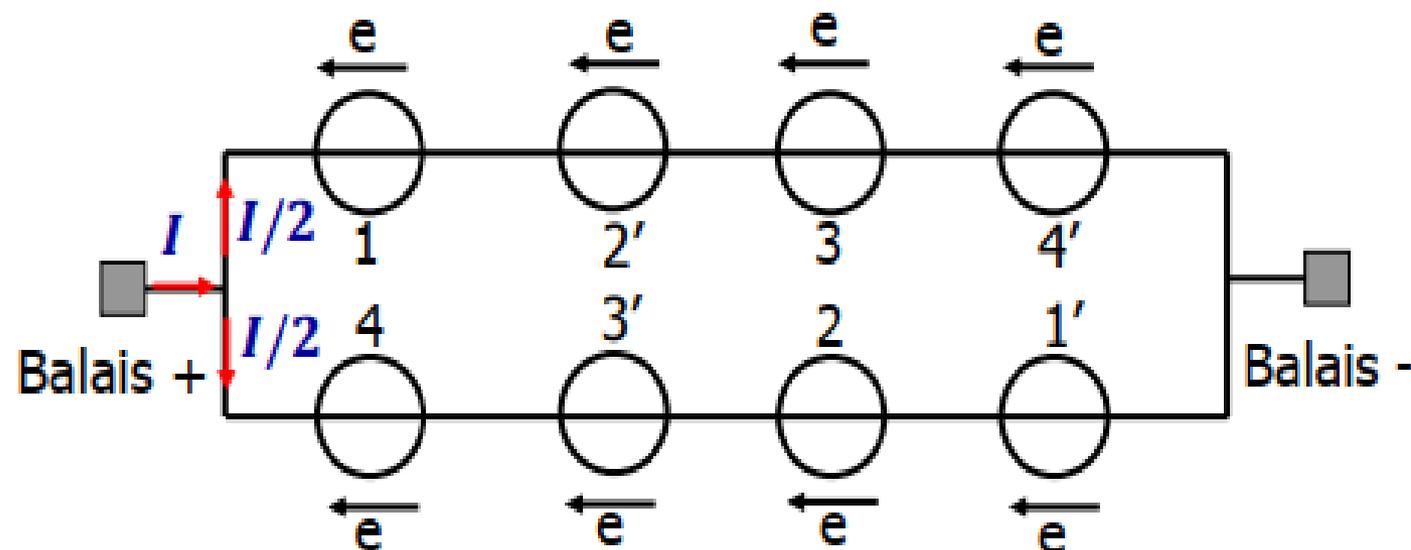
- On choisit un induit simplifié avec 8 encoches contenant chacun un conducteur. Le conducteur 1 est réuni à l'arrière au conducteur 2'; Le 2' au 3 par une liaison avant; etc...



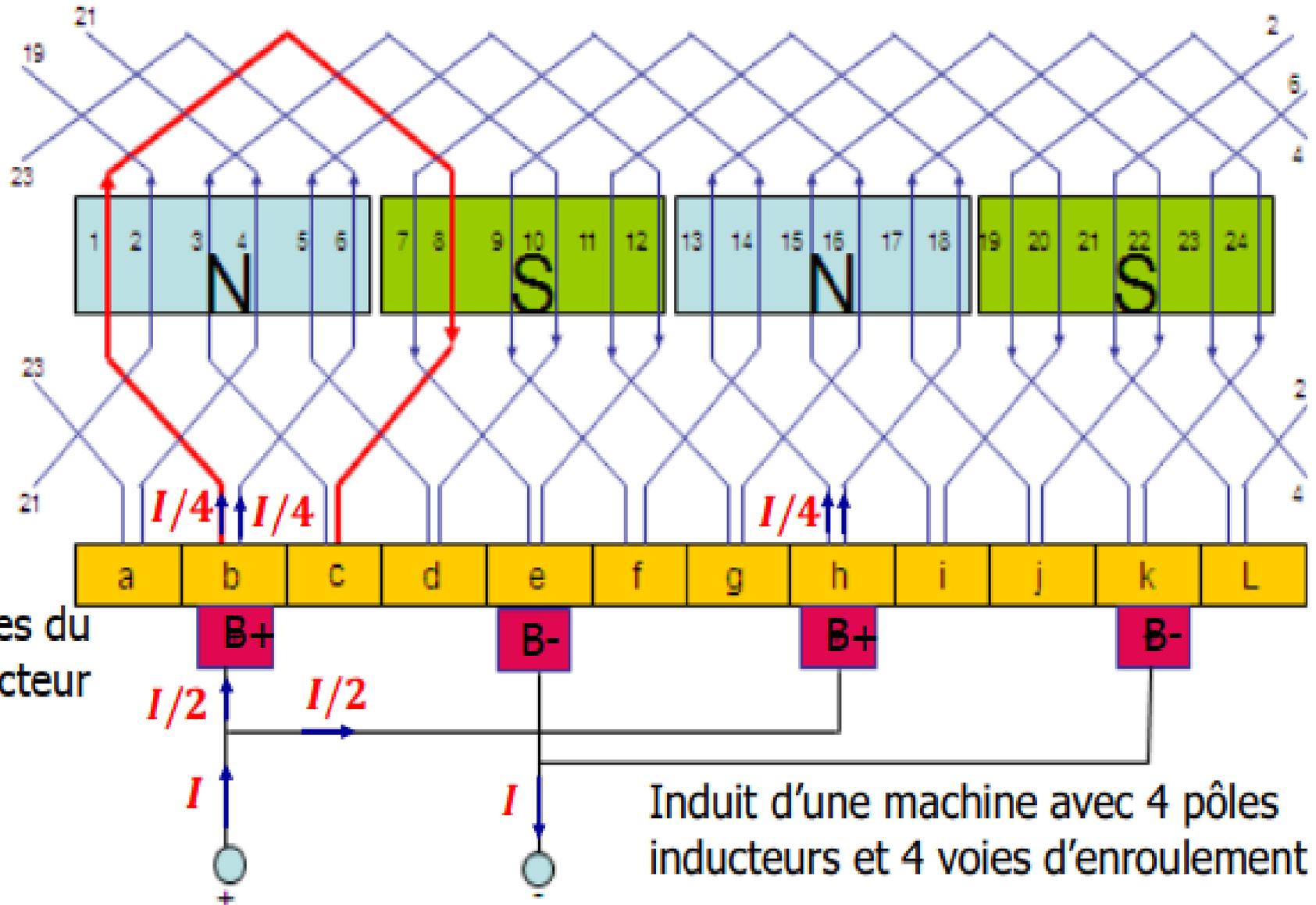
Le courant se divise dans deux voies

## Représentation développée des f.c.e.m:

- Les portions de fils logées dans les encoches sont les conducteurs actifs. Ils sont donc le siège de f.c.e.m induites.
- Pour une machine bipolaire, il y'a deux chemins possibles ou voies d'enroulement pour aller du balais (+) au balais (-). Chaque voie est traversée par la moitié du courant.
- Ces 2 voies comportent le même nombre de conducteurs en série sont identiques et en parallèle.
- Lorsqu'un conducteur change de voie d'enroulement, le courant qui le traverse s'inverse, et la f.c.e.m aussi.
- Chaque conducteur est représenté par une f.c.e.m.

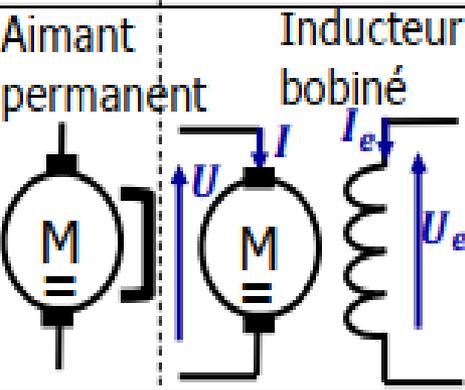
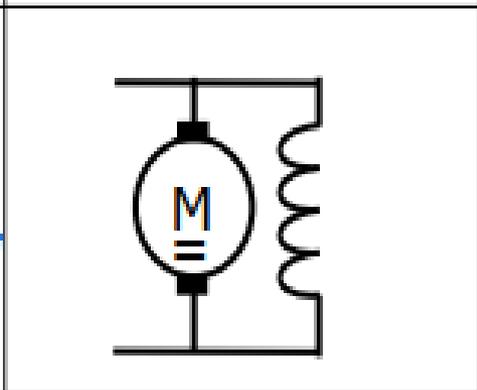
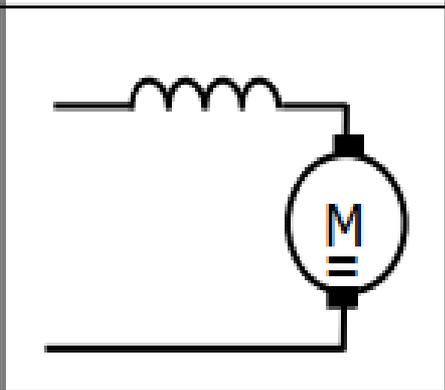
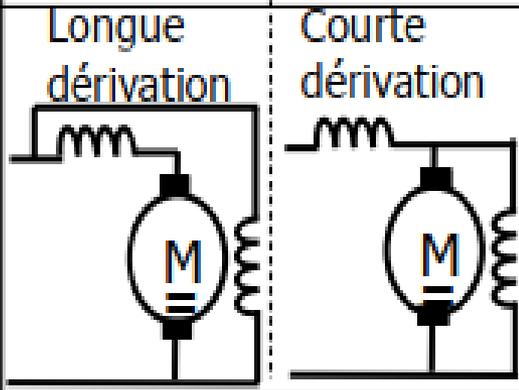


- Pour les machines multipolaires, avec un nombre de pôles  $2p$  ( $p$  nombre paires de pôles). L'enroulement peut comporter un nombre de voies  $2a$  ( $a$  nombre de paires de voies). Chaque voie est parcourue par  $I/2a$ .



## 4. Excitation de la machine à courant continu

On parle d'excitation pour décrire le mode d'alimentation des circuits inducteur bobiné et induit des moteurs à courant continu.

Excitation séparée (indépendante)	Excitation dérivation (moteur shunt)	Excitation série (moteur universel)	Excitation composée (moteur compound)
<p>Aimant permanent Inducteur bobiné</p> 			<p>Longue dérivation Courte dérivation</p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Dans le cas d'un inducteur bobiné, nécessite 2 alimentations,</li> <li>* Petites puissances pour les moteurs à aimants permanents</li> <li>* Risque d'emballement à vide?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Vitesse relativement constante, quelle que soit la charge (autorégulateur de vitesse),</li> <li>* Couple de démarrage moyen,</li> <li>* Absence d'emballement à vide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Fort couple à basse vitesse, Autorégulateur de puissance: la vitesse décroît lorsque la charge augmente,</li> <li>* Risque d'emballement à vide.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Couple de démarrage meilleur qu'en dérivation, mais plus faible qu'en série,</li> <li>* Vitesse relativement stable quelle soit la charge,</li> <li>* Absence d'emballement à vide.</li> </ul>

## 7. Expression de la force contre-électromotrice

Grandeur	Désignation
$U$ (V)	tension d'alimentation de l'induit
$E$ (V)	force contre-électromotrice induite
$R$ ( $\Omega$ )	résistance de l'induit
$I$ (A)	intensité du courant absorbé par l'induit
$U_e$ (V)	tension d'alimentation de l'inducteur ou tension d'excitation
$I_e$ (A)	courant inducteur ou courant d'excitation
$R_e$ ( $\Omega$ )	résistance de l'inducteur
$p$	nombre de paires de pôles
$a$	nombre de paires de voies d'enroulement
$N$	nombre de conducteurs actifs de l'induit
$\phi$ (Weber)	flux moyen sous un pôle inducteur
$n$ (tours/s)	fréquence de rotation
$\Omega$ (rad/s)	vitesse angulaire de l'induit

- Au cours d'un tour complet de durée  $\Delta t = 1/n$ , un conducteur actif coupe  $p$  fois le flux  $+\phi$  et  $p$  fois le flux  $-\phi$  sous un pôle sud et un pôle nord .
- La variation totale du flux coupé par un conducteur est:

$$\Delta\phi = p\phi - (-p\phi) = 2p\phi$$

- Chaque conducteur est le siège d'une f.c.e.m (loi de Faraday):

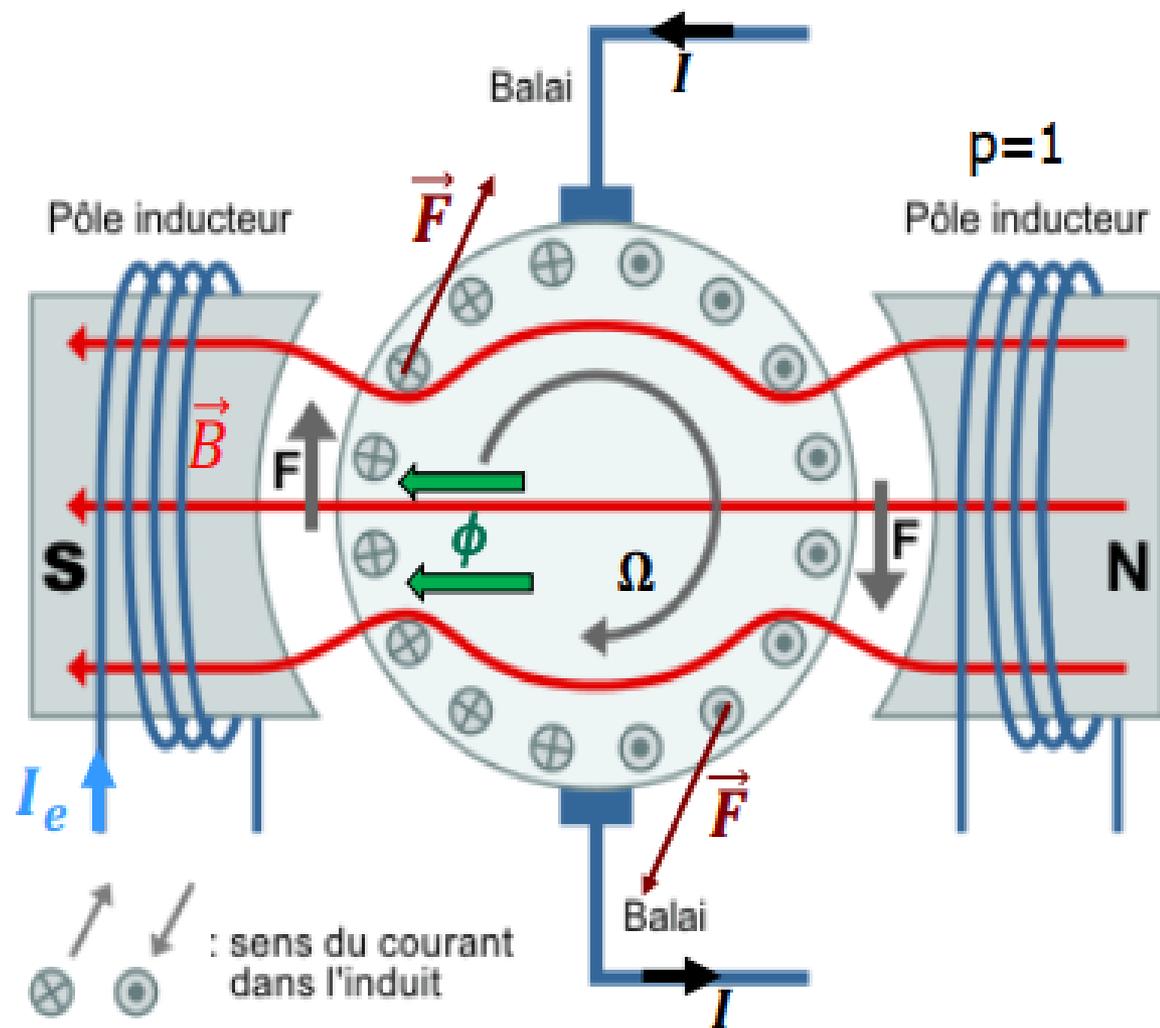
$$e = \Delta\phi / \Delta t = 2pn\phi$$

- Les conducteurs sont organisés en  $2a$  voies d'enroulement en parallèle de  $N/2a$  conducteurs en série par voie.
- L'expression de la f.c.e.m totale est:

$$E = \frac{N}{2a} e$$

- Alors:

$$E = \frac{p}{a} N n \phi = \left( \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \right) \phi \Omega$$



D'où l'expression de la f.c.e.m induite aux bornes de l'induit d'une machine multipolaire et multivoies d'enroulements:

$$E = K\phi\Omega ; \quad K = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N$$

$K$  (en  $V \cdot rad^{-1} \cdot s \cdot Wb^{-1}$ ) est une constante qui dépend de la machine.

### La f.c.e.m dépend donc:

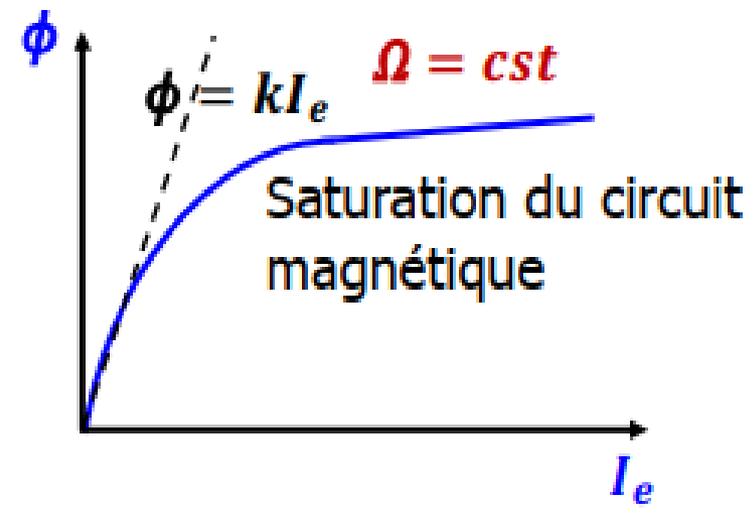
- des paramètres de construction, purement technologiques ( $p, a, N$ );
- du paramètre de fonctionnement interne, flux sous un pôle  $\phi$ ;
- du paramètre de fonctionnement externe, vitesse de rotation  $\Omega$ .

### Propriétés:

- À vitesse constante  $\Omega = cst$ , la f.c.e.m est proportionnelle au flux  $\phi$ , donc proportionnelle au courant d'excitation  $I_e$ , si le circuit magnétique n'est pas saturée.

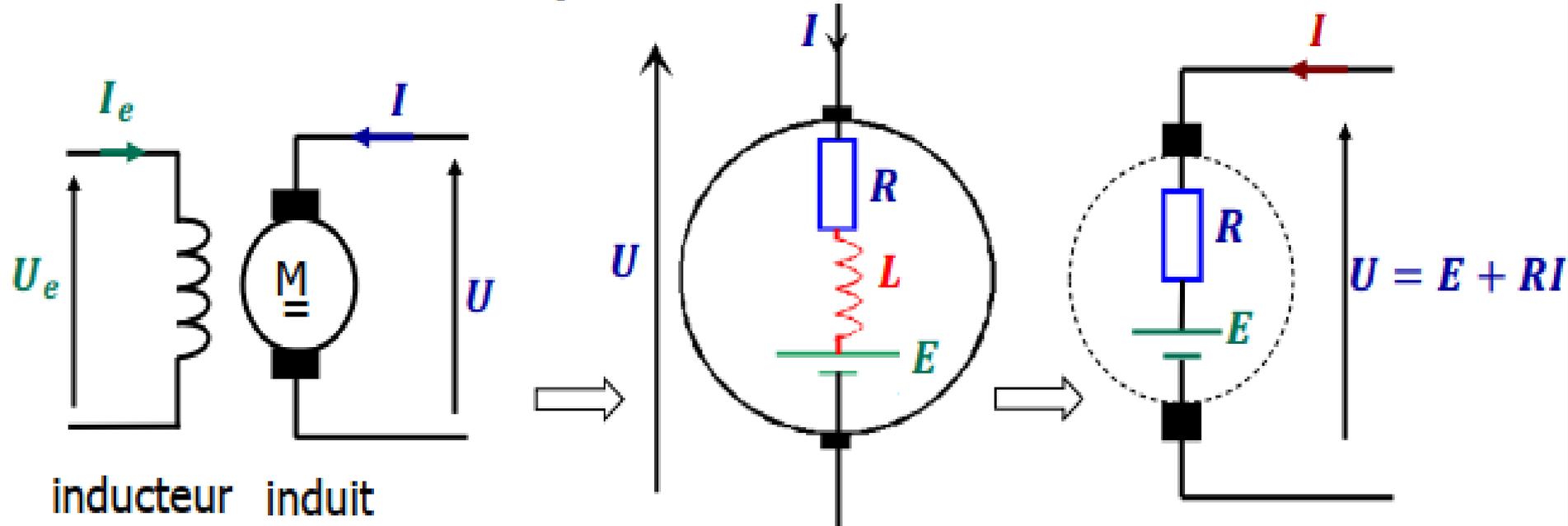
$$E = kI_e$$

- À flux constant  $\phi = cst$ , la f.c.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega$  de la machine.  $E = K_e\Omega ; K_e = K\phi$



## 8. Schéma équivalent de l'induit en régime établi

Moteur à excitation indépendante:



Equation électrique à l'induit:  $U = E + RI + L \frac{dI}{dt}$

- En régime permanent, l'inductance propre des enroulements d'induit n'a pas d'effet:  $I = cst \Rightarrow L \frac{dI}{dt} = 0$
- La source fournit à l'induit la puissance électrique:  $P_e = UI = EI + RI^2$
- Les pertes par effet de joule dans l'induit sont:  $P_{jt} = RI^2$
- La puissance électromagnétique (transformée en puissance mécanique) transmise à l'induit est:  $P_{em} = EI$

## 9. Expression du couple électromagnétique

Les forces électromagnétiques de Laplace constituent un couple électromagnétique qui entraîne la rotation du rotor. Ce couple provient de l'interaction entre le flux magnétique inducteur  $\phi$  et le courant  $I$  dans les conducteurs d'induit.

### Moment du couple électromagnétique:

- La puissance électromagnétique  $P_{em}$  est convertie en puissance mécanique:

$$P_{em} = EI = C_{em}\Omega$$

- Donc l'expression du moment du couple électromagnétique  $C_{em}$  (en N.m), souvent appelé par les électrotechniciens "couple électromagnétique" est:

$$C_{em} = K\phi I = \left( \frac{1}{2\pi} \frac{p}{a} N \right) \phi I$$

Comme dans toute machine électromagnétique, le couple  $C_{em}$  est proportionnel:

- Au flux  $\phi$  créé par l'inducteur et,
- Au courant  $I$  absorbé par l'induit.

## Sens de rotation:

Le sens du couple de forces électromagnétiques qui produit la rotation dépend de celui :

- du champ magnétique, donc du courant d'excitation  $I_e$ ,
- de la polarité de l'induit obtenue par le sens du courant d'induit  $I$ .

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser, soit les polarités de l'induit, soit celles de l'inducteur.

## Expression du couple utile:

Le couple utile  $C_u$  (ou couple moteur  $C_m$  fournit à la charge qui l'entraîne) disponible sur l'arbre du moteur est légèrement inférieur au couple électromagnétique  $C_{em}$ :

$$C_u = C_{em} - C_p$$

Le couple de pertes  $C_p = (P_{fer} + P_{pm})/\Omega$  est dû:

- aux pertes ferromagnétiques  $P_{fer}$  dans le rotor (par hystérésis et courants de Foucault). Ces pertes dépendent des valeurs du champ magnétique  $B$  et la vitesse de rotation  $\Omega$ ,
- aux pertes mécaniques  $P_{pm}$ : frottement aux paliers, frottement aux contacts balais-collecteur, pertes par ventilation. Elles augmentent avec la vitesse de rotation  $\Omega$ .

- Équation générale de la dynamique du groupe moteur et charge entraînée de couple résistant  $C_r$  s'écrit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$$

Avec  $J$  est le moment d'inertie.

- En régime établi  $\Omega = cst \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} =$

$$0 \Rightarrow C_u = C_r$$

À vide:

$$C_u = C_r = 0;$$

- L'induit absorbe un courant  $I_0$ , le couple de perte est:

$$C_p = C_{em} = K\phi I_0$$

**En charge:** Le couple de pertes  $C_p$  est très faible devant  $C_{em}$ , ce qui conduit à:

$$C_u = C_{em} - C_p = K\phi(I - I_0) \cong K\phi I$$

**Propriété:**

Pour un flux  $\phi$  constant, le courant appelé  $I$  par le moteur est proportionnel au couple demandé par la charge. La charge impose donc le courant d'induit.

