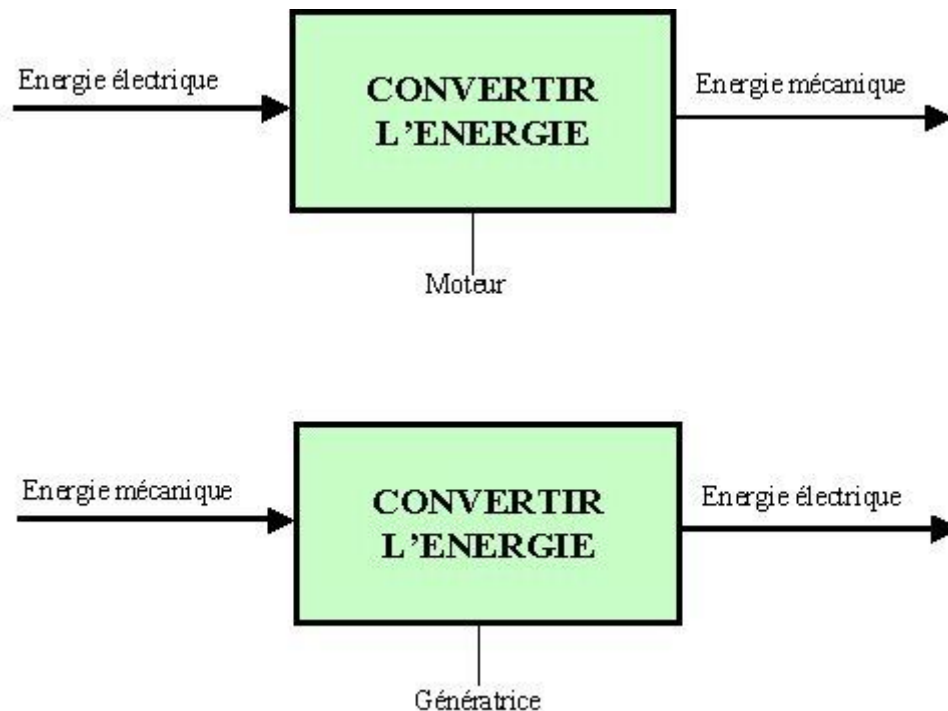


Commande des moteurs à courant continu

I)- GENERALITES

Les moteurs à courant continu à excitation séparée sont encore utilisés assez largement pour l'entraînement à vitesse variable des machines. Très facile à miniaturiser, ils s'imposent dans les très faibles puissances. Ils se prêtent également fort bien à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples pour des performances élevées et jusqu'à des puissances importantes. Leurs caractéristiques permettent également une régulation précise du couple, en moteur ou en génératrice. Leur vitesse de rotation nominale est adaptable aisément par construction à toutes les applications, car elle n'est pas liée à la fréquence du réseau. Ils sont en revanche moins robustes que les moteurs asynchrones et nécessitent un entretien régulier du collecteur et des balais.

1)- FONCTION D'USAGE

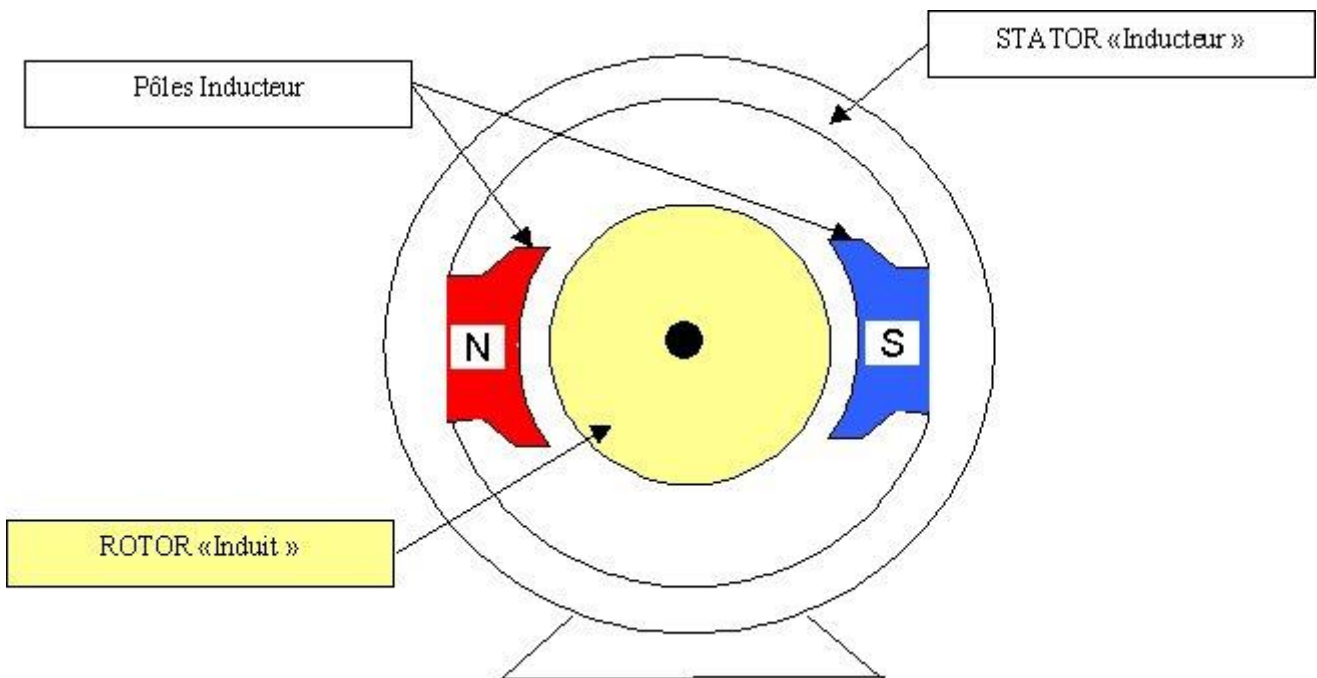


Remarque : La machine à courant continu est réversible c.à.d. qu'elle peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice.

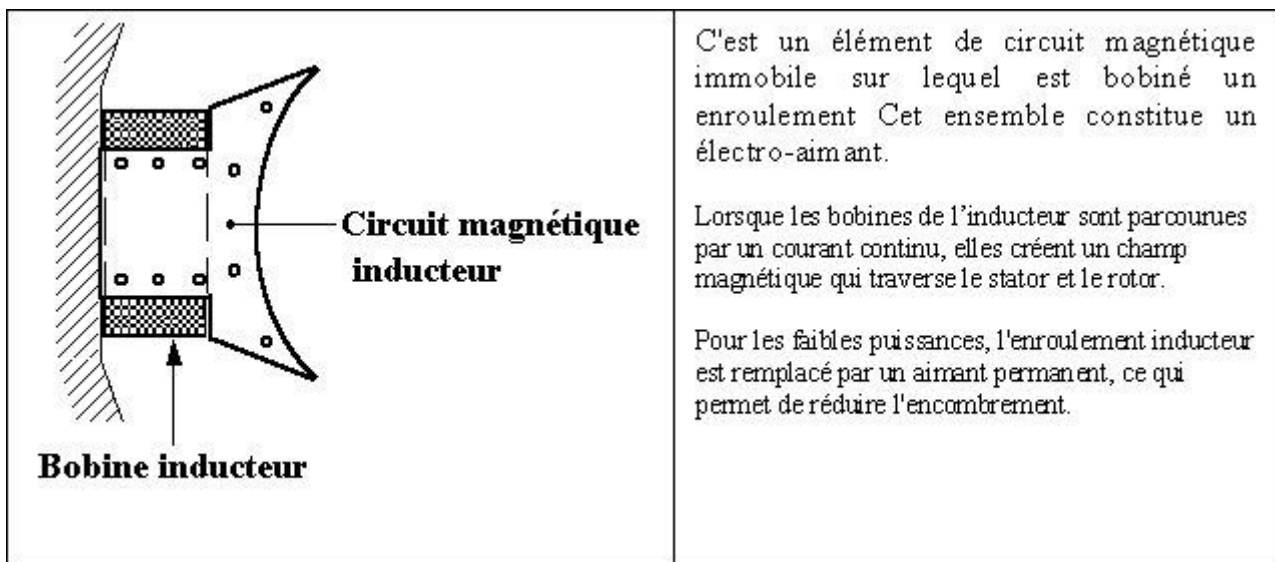
2)- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'application par excellence de la loi de Laplace est le moteur à courant continu. Cette loi affirme que l'action d'un champ magnétique sur un conducteur traversé par un courant, produit une force, cette force engendre un couple qui fait tourner le moteur.

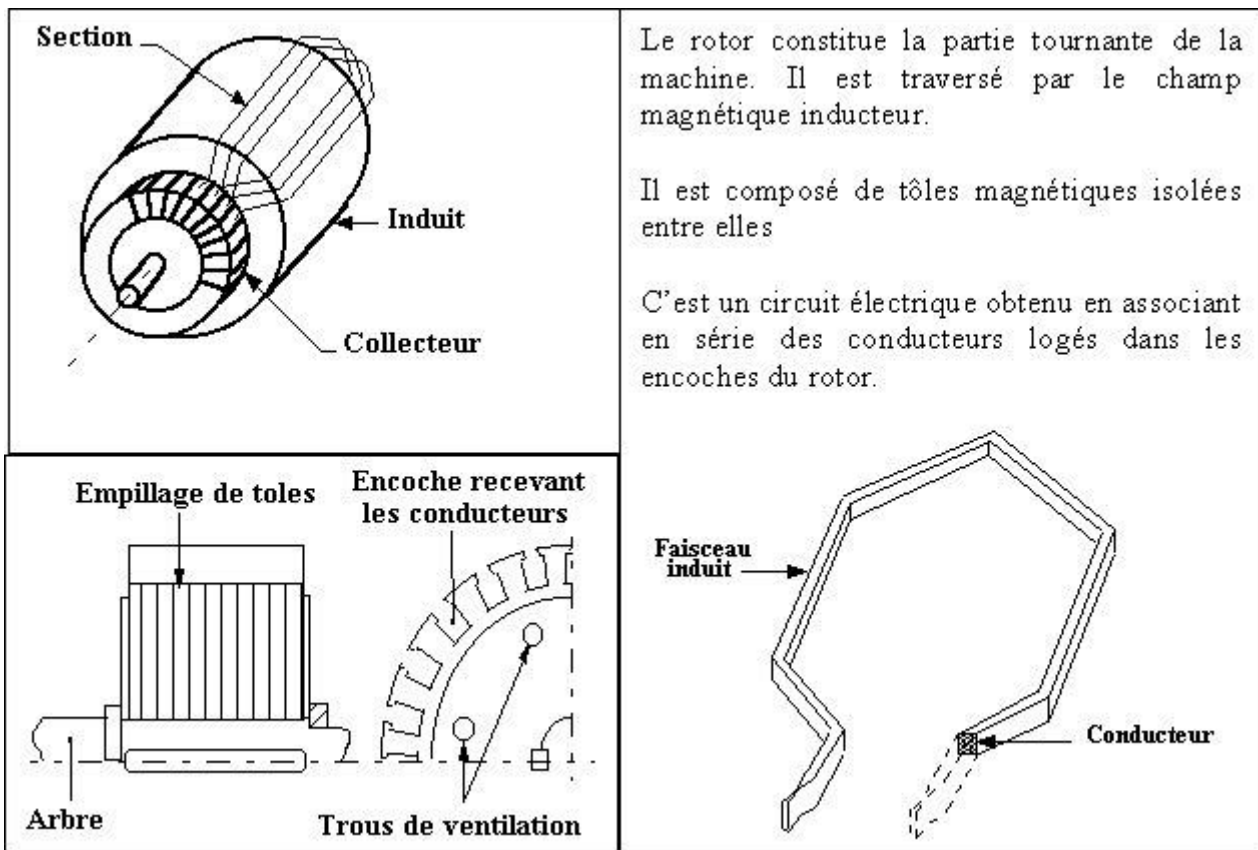
II)- CONSTITUTION D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU



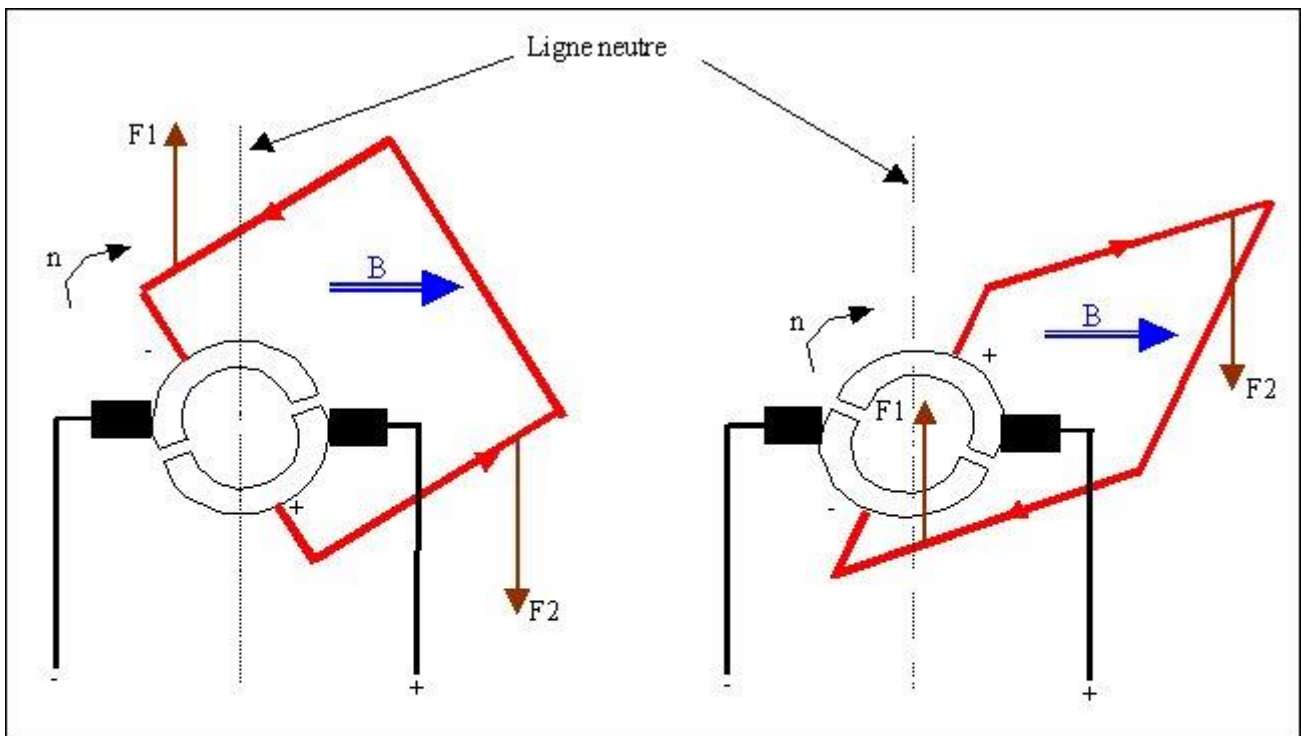
1)- L'INDUCTEUR OU LE STATOR



2)- L'INDUIT OU LE ROTOR



3)- COLLECTEUR ET BALAIS



Le système balais – collecteur permet d'alimenter les conducteurs du rotor. Les balais sont fixes et solidaires du stator tandis que le collecteur est fixé au rotor.

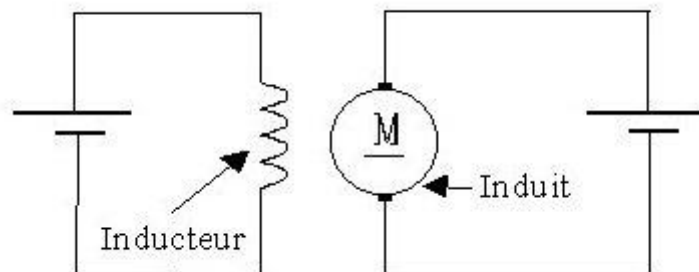
Les balais sont reliés à l'alimentation électrique de l'induit et sont en contact permanent avec le collecteur par frottement. Le courant peut ainsi passer dans les conducteurs du rotor.

Le collecteur est formé de deux demi-sections qui permettent d'inverser le sens de circulation du courant dans le conducteur du rotor au passage de la ligne neutre.

III)- LES DIFFERENTS TYPES DE MOTEUR

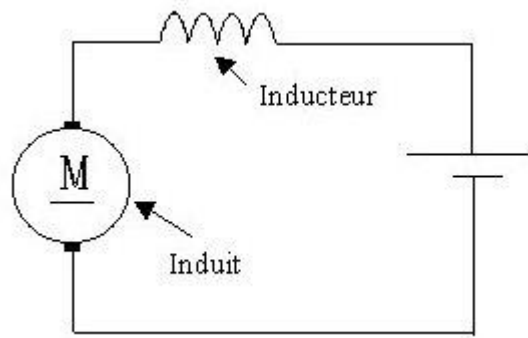
1)- MOTEUR A EXCITATION SEPARÉE

Les bobinages induit et inducteur sont connectés en parallèle. L'inversion du sens de rotation s'obtient en général par inversion de la tension d'induit.



2)- MOTEUR A EXCITATION SERIE

Ce moteur est de construction semblable à celui du moteur à excitation séparée. Le bobinage inducteur est connecté en série avec le bobinage induit, d'où son appellation. L'inversion du sens de rotation est obtenue par inversion des polarités de l'induit ou de l'inducteur.



IV)- MODELE EQUIVALENT DU MOTEUR

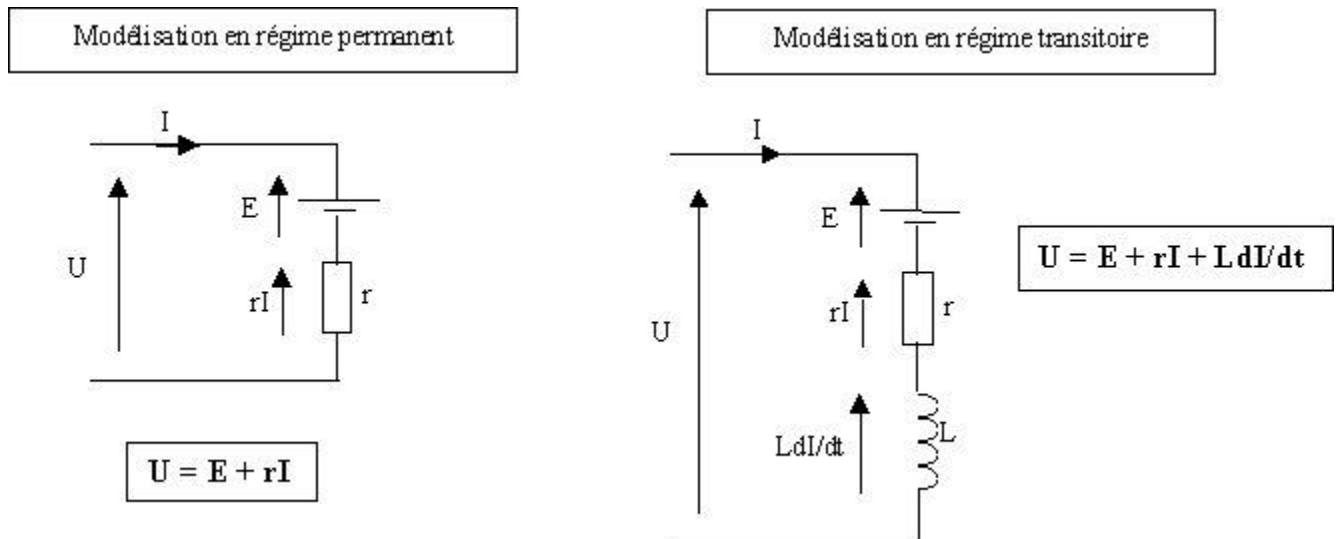
1)- LA FORCE CONTRE ELECTROMOTRICE

Un moteur en rotation présente une force contre électromotrice noté E aux bornes de l'induit :

$$E = \frac{p}{a} N n \Phi$$

- E : f.é.m. en V
- N : nombre de conducteurs de l'induit
- n : vitesse de rotation en tours par seconde (tr/s)
- Φ : flux inducteur en webers (Wb)
- p : nombre de paires de pôles
- a : nombre de voies d'enroulement

2)- SCHEMA EQUIVALENT DU MCC



- r : Résistance interne du moteur caractérisant la résistance du bobinage de l'induit.
- L : Inductance interne du moteur caractérisant l'inductance du bobinage de l'induit.

En régime permanent le courant qui circule dans le moteur est constant donc la chute de tension aux bornes de l'inductance interne du moteur est nulle. $LdI/dt = 0$ donc $U = E + rI$

V)- CARACTERISTIQUES DU MOTEUR

1)- LA VITESSE DE ROTATION

D'après ce qui précède:

- $U = E + rI$
- $E = k.n.\Phi$ avec $k = pN/a$

En supposant le flux Φ constant on peut admettre que la force contre-électromotrice est proportionnelle à la vitesse de rotation.

$$E = K.\Omega$$

- Ω : vitesse de rotation en rad/s; $\Omega = n/2\pi$
- $K = pN2\pi/a$

$$\Omega = (U - rI)/K$$

Donc si l'on néglige la chute de tension due à la résistance de l'enroulement rI on peut admettre que la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu est proportionnelle à sa tension d'alimentation d'induit. $U = E + rI = K.\Omega$ donc:

$$\Omega = U/K$$

2)- LA PUISSANCE ELECTROMOTRICE

La puissance électromotrice notée P_{em} en Watts: **$P_{em} = E . I$**

3)- LE COUPLE ELECTROMOTEUR

Le couple électromoteur notée T_{em} en N.m: **$T_{em} = K . I$**

$T_{em} = P_{em}/\Omega = E.I/\Omega = K\Omega.I/\Omega = K.I$ donc $T_{em} = K.I$

4)- LA PUISSANCE ABSORBÉE

- par l'induit $P=UI$
- par l'inducteur $p=ui$

La puissance absorbée totale par le moteur en Watts: $P_a = P + p = UI + ui$

$$P_a = UI + ui$$

- U, I : tension et courant d'induit
- u, i : tension et courant de l'inducteur

5)- PUISSANCE UTILE (MECANIQUE)

La puissance mécanique notée P_u : $P_u = T_u / \Omega$

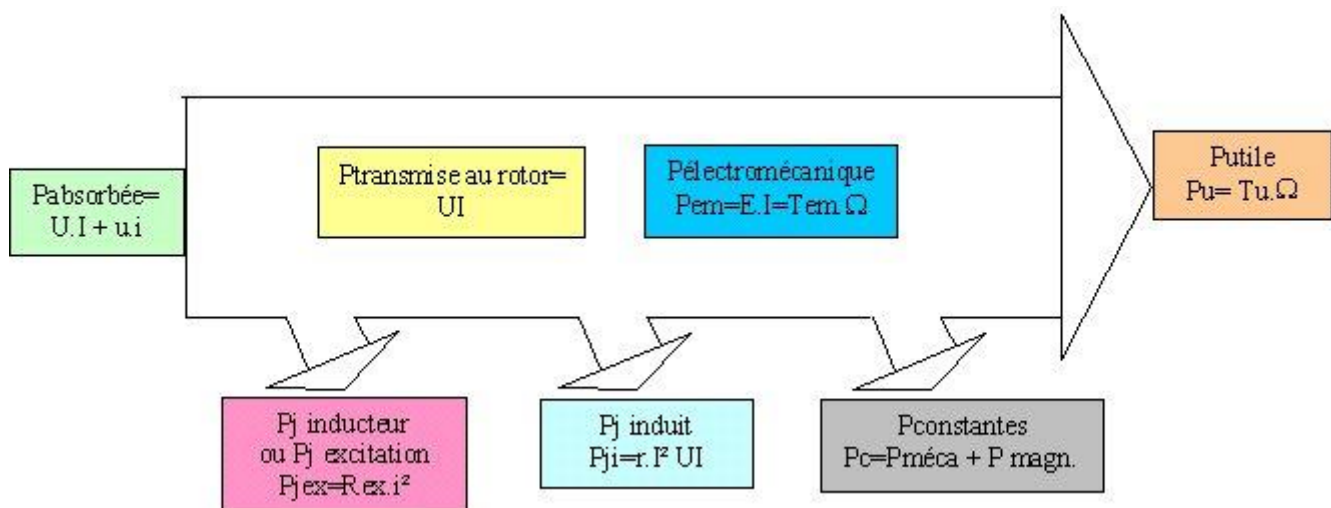
- T_u : couple utile disponible sur l'arbre moteur en N.m
- Ω : vitesse de rotation en rad/s

6)- RENDEMENT DU MOTEUR

Le rendement noté η : $\eta = P_u / P_a$

- η s'exprime en %

VI)- BILAN DE PUISSANCE



1)- PERTES JOULES INDUCTEUR OU D'EXCITATION

Elles traduisent l'énergie dissipée dans le bobinage inducteur. $P_{jex} = R_{ex}.i^2 = u.i$

- R_{ex} étant la résistance du bobinage inducteur.

2)- PERTES JOULES INDUIT

Elles traduisent l'énergie dissipée dans le bobinage induit. $P_{ji} = r.I^2$

- r étant la résistance du bobinage induit

3)- LES PERTES CONSTANTES

C'est la somme des pertes mécanique (frottement) et des pertes magnétiques (foucault et hystérésis). Ces pertes sont supposées constantes quel que soit le point de fonctionnement du moteur.

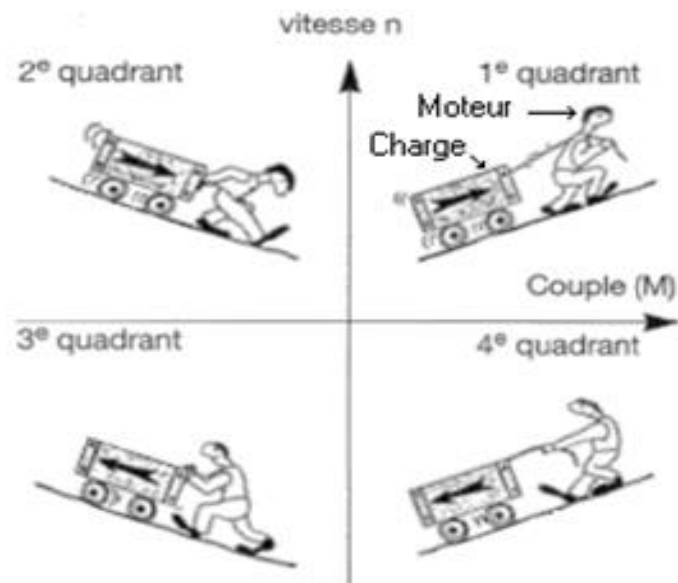
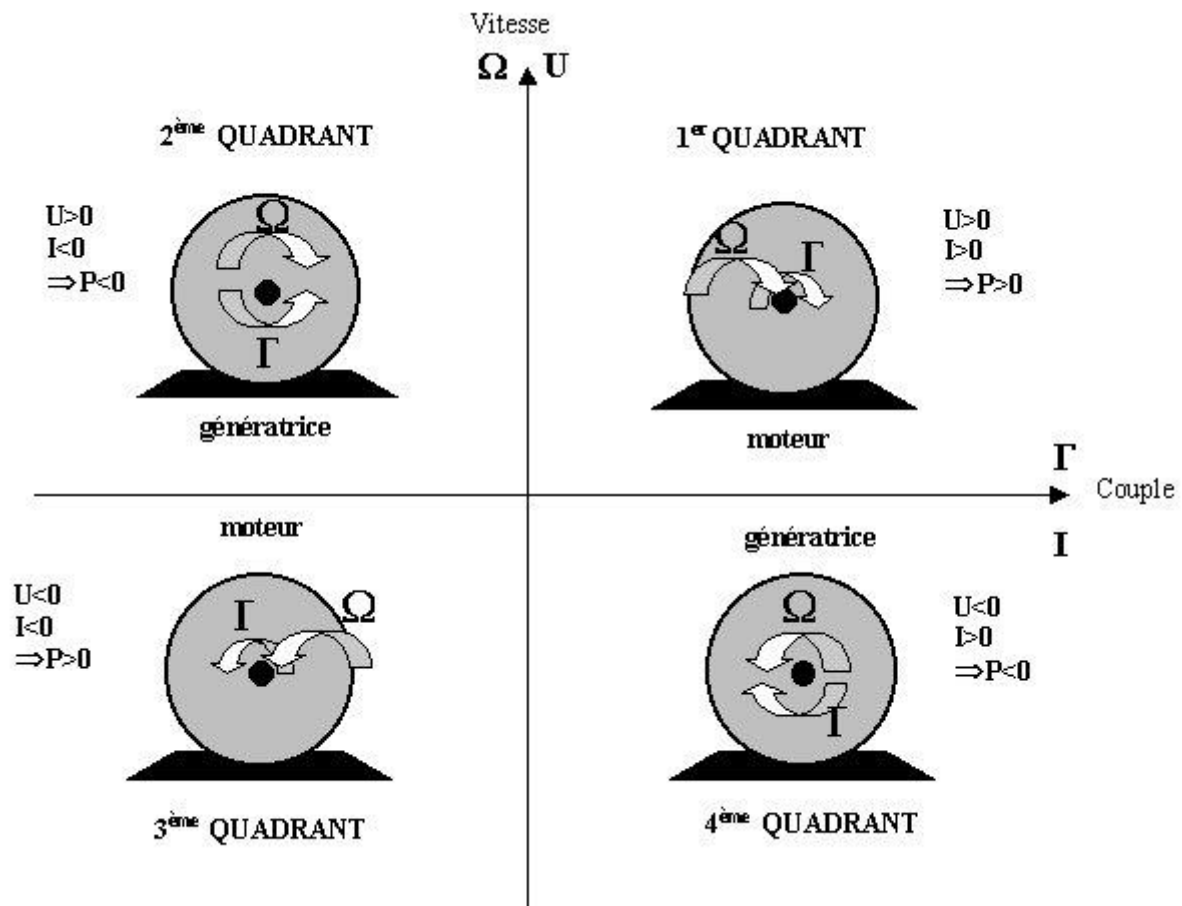
VII)- REVERSIBILITE DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

1)- PRINCIPE

Si on place un conducteur du rotor(induit) dans le champ magnétique produit par le stator (inducteur), et que l'on déplace ce conducteur, il est le siège d'un courant induit On a donc créé un générateur de courant. La machine à courant continu fonctionne alors en générateur, c'est le principe de la dynamo.

2)- FONCTIONNEMENT DANS LES QUATRE QUADRANTS

La machine à courant continu est fondamentalement réversible. Ainsi en fonction du signe de la puissance absorbée elle peut fonctionner en moteur ou en générateur (frein). On définit ainsi quatre quadrants de fonctionnement pour la machine.



Par exemple lors d'un déplacement horizontal (cas d'un train), la machine fonctionne :

- à l'aller, en moteur dans le quadrant 1
- puis au retour, toujours en moteur dans le quadrant 3
- et entre ces deux cas, le ralentissement forcé jusqu'à l'arrêt s'effectue dans le deuxième quadrant pour l'aller et dans le quatrième quadrant pour le retour.

VIII)- LA PLAQUE SIGNALÉTIQUE DU MOTEUR

La plaque signalétique spécifie les valeurs du point de fonctionnement nominal (point pour lequel le moteur fonctionne normalement). On trouve sur la plaque signalétique du moteur différentes informations :

- Puissance nominale
- Vitesse nominale
- Tension et courant d'induit
- Tension et courant d'excitation

IX) INVERSION DU SENS DE ROTATION

Deux possibilités existent pour inverser le sens de rotation d'un moteur à courant continu :

- Soit inverser le sens du courant d'excitation. (inversion tension d'excitation)
- Soit de changer le sens du courant de l'induit. (inversion tension d'induit)

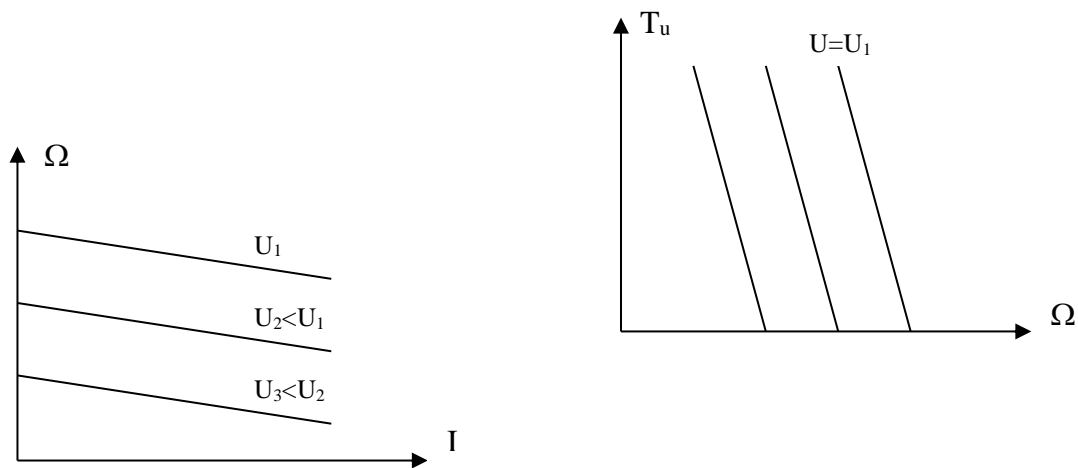
II.X) VARIATION DE VITESSE

1) Par action sur le courant d'excitation

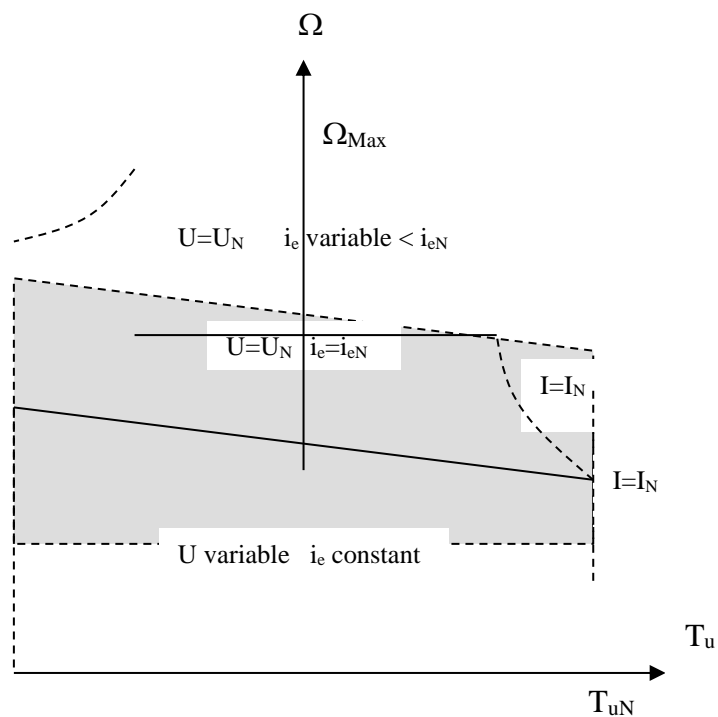
A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation (i_e). L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur.

2) Par action sur la tension d'alimentation

A flux constant, la vitesse du moteur est quasiment proportionnelle à U : $\Omega = \frac{U - RI}{K\phi} \approx \frac{U}{K\phi}$.
L'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé ou d'un hacheur permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à Ω_N .

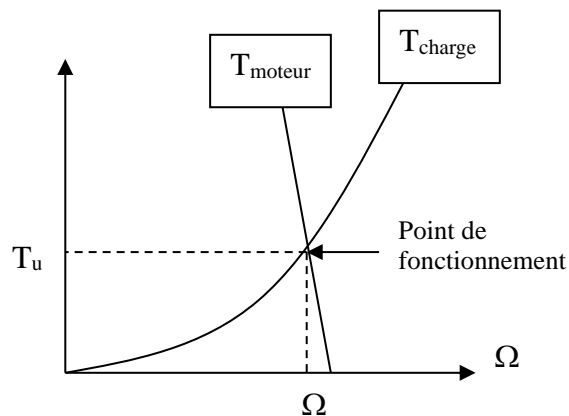


3) Domaine de variation possible



4) Régimes transitoires

En régime permanent, le point de fonctionnement du moteur se situe à l'intersection de sa propre caractéristique couple/vitesse avec celle imposée par la charge qu'il entraîne et l'on a, à vitesse constante, $T_u = T_r$:



Lors des régimes transitoires (démarrage, changements de régime, etc...), l'évolution du point de fonctionnement est régie par l'équation fondamentale de la dynamique des systèmes en rotation :

$$J_{\text{tot}} \frac{d\Omega}{dt} = T_u - T_r = T_{\text{em}} - T_p - T_r \quad (1)$$

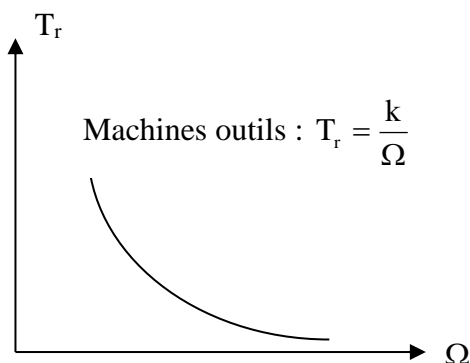
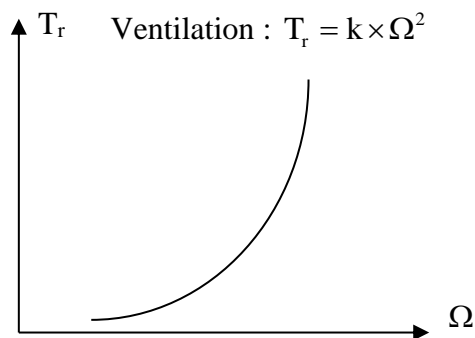
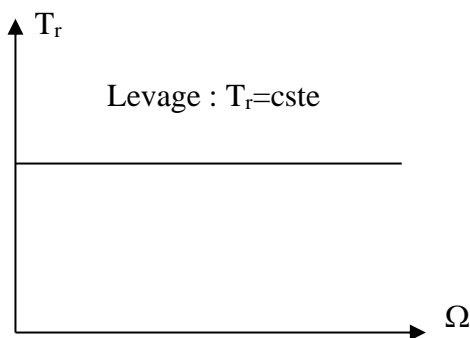
Avec : J_{tot} : moment d'inertie total (moteur + charge) en kg.m^2

$\frac{d\Omega}{dt}$: accélération angulaire (dérivée de la vitesse)

Le moteur accélère quand $T_u > T_r$ ($\frac{d\Omega}{dt} > 0$) et ralenti quand $T_u < T_r$.

Pour connaître l'évolution de la vitesse, il faut d'une part connaître la loi de variation du couple résistant et d'autre part être capable de résoudre l'équation différentielle (1)

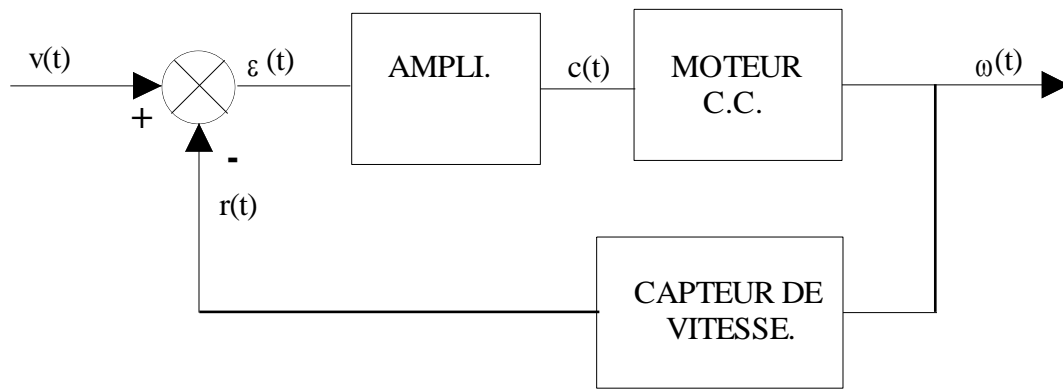
Couples résistants « types » :



III.X) FONCTIONNEMENT D'UN ASSERVISSEMENT DE VITESSE.

1) STRUCTURE D'UN ASSERVISSEMENT DE VITESSE

La structure est définie ci-dessous sur un schéma-bloc ou diagramme fonctionnel :



Asservissement de vitesse.

Les fonctions nécessaires sont réalisées par différents organes :

* UN CAPTEUR : Une génératrice tachymétrique, par exemple, va fournir une tension en retour $r(t)$, qui est une image de la vitesse de rotation $\omega(t)$.

* UN COMPAREUR : Représenté par un cercle croisé, il effectue la soustraction entre la consigne $v(t)$ et le retour $r(t)$ en générant un signal d'écart $\varepsilon(t)$. Les signes plus ou moins indiquent la nature de la comparaison.

* UN AMPLIFICATEUR : Il va amplifier le signal d'écart $\varepsilon(t)$ pour fournir un signal de commande $c(t)$ suffisamment grand pour piloter le moteur.

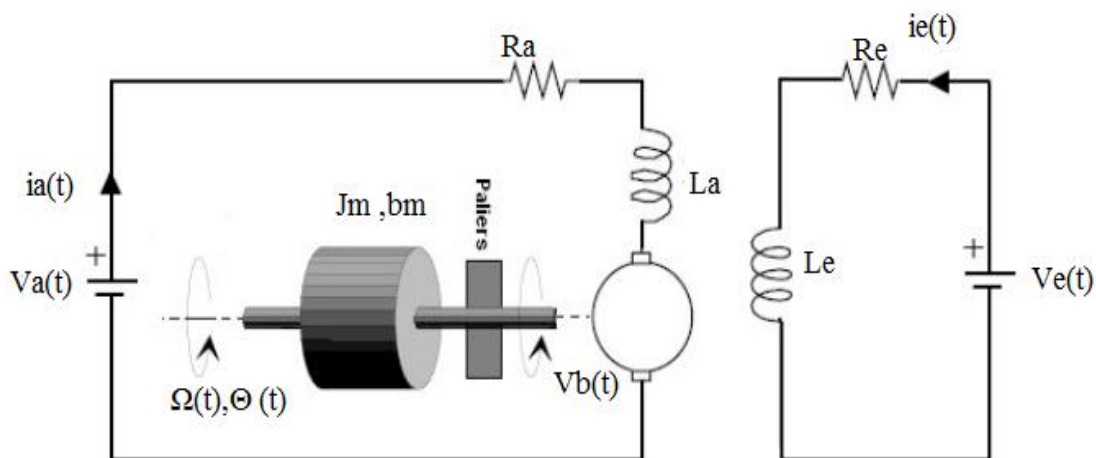
* UN ACTIONNEUR : Il va transformer le signal de commande $c(t)$ en énergie mécanique. Ici un moteur à courant continu dont la vitesse varie avec la tension qui lui est appliquée.

ATTENTION: il ne faut pas confondre la consigne et la commande.

- * La consigne est le but à atteindre : elle est imposée de l'extérieur du système.
- * La commande dépend de la consigne mais aussi de l'état du système.

2) LES EQUATIONS DE LA MACHINE A COURANT CONTINU :

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné par



Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée

- V_a et i_a : sont la tension et le courant d'induit.

- V_e et i_e : sont la tension et le courant d'inducteur.
- R_a et L_a : sont la résistance et l'inductance de l'induit.
- R_e et L_e : sont la résistance et l'inductance de l'inducteur ou d'excitation.
- V_b : la force électromotrice interne du moteur à courant continu.
- Ω : la vitesse de rotation.
- Θ : l'angle du rotor ou la position.
- C_m : le couple produit par le moteur.
- J_m : moment d'inertie du moteur.
- b_m : coefficient de frottement visqueux.

Avec : $\Omega = \frac{d\Theta}{dt}$, $V_b(t) = K_b \Omega(t)$, $C_m = K_m i_a(t)$.

➤ **Les équations électriques de la machine sont :**

$V_e(t) = R_e i_e(t) + L_e \frac{di_e}{dt}$: Pour l'excitation (bobinage inducteur).

$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + V_b(t)$: Pour l'induit.

➤ **L'équation mécanique :**

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_m - b_m \Omega(t).$$

Hypothèse :

- On suppose que le couple de perturbation est négligeable ($C_p = 0$).
- On suppose que le flux d'excitation est constant.

3) FONCTION DE TRANSFERT DU MOTEUR :

- On passe en la place :

L'équation électrique du fonctionnement de la machine à courant continu s'écrit :

$$V_a(s) = R_a i_a(s) + s L_a i_a(s) + V_b(s) \dots\dots\dots (1)$$

Avec s est l'opérateur de Laplace.

On établit que la fem V_b d'induction est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation de l'induit :

$$V_b(s) = K_b \Omega(s) \dots\dots\dots (2)$$

L'équation mécanique de la machine à courant continu en régime dynamique (variable) s'écrit ainsi :

$$sJ_m \Omega(s) = C_m - b_m \Omega(s) \dots\dots\dots (3)$$

- En combinant (I-1) et (I-2) on obtient :

$$V_a(s) = R_a i_a(s) + sL_a i_a(s) + K_b \Omega(s).$$

- En modifiant (3), On a :

$$sJ_m \Omega(s) = K_m i_a(s) - K_b \Omega(s).$$

- On en déduit l'expression de $\Omega(s)$:

$$\Omega(s) = \frac{K_m}{b_m + sJ_m} i_a(s).$$

- On peut en sortir l'expression de $i_a(s)$:

$$i_a(s) = \frac{b_m + sJ_m}{K_m} \Omega(s).$$

- On l'injecte à présent dans l'équation (1) :

$$V_a(s) = \Omega(s) \left[\left(\frac{b_m + sJ_m}{K_m} \right) (R_a + sL_a) + K_b \right].$$

La fonction de transfert cherchée $G(s)$ est entre la tension entrant dans le moteur $V_a(s)$ et vitesse de sortie $\Omega(s)$.

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{(R_a + sL_a)(b_m + sJ_m) + K_b K_m}.$$

➤ **Le schéma bloc de cette fonction de transfert est le suivant :**

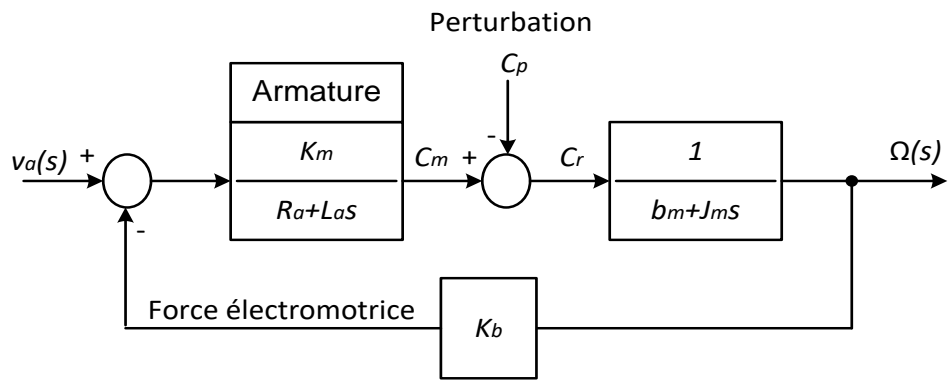


Schéma fonctionnel du moteur à courant continu à excitation séparée.