Chapitre 6

MACHINES A COURANT CONTINU
FONCTIONNEMENT EN MOTEUR

1. Classification des machines électriques

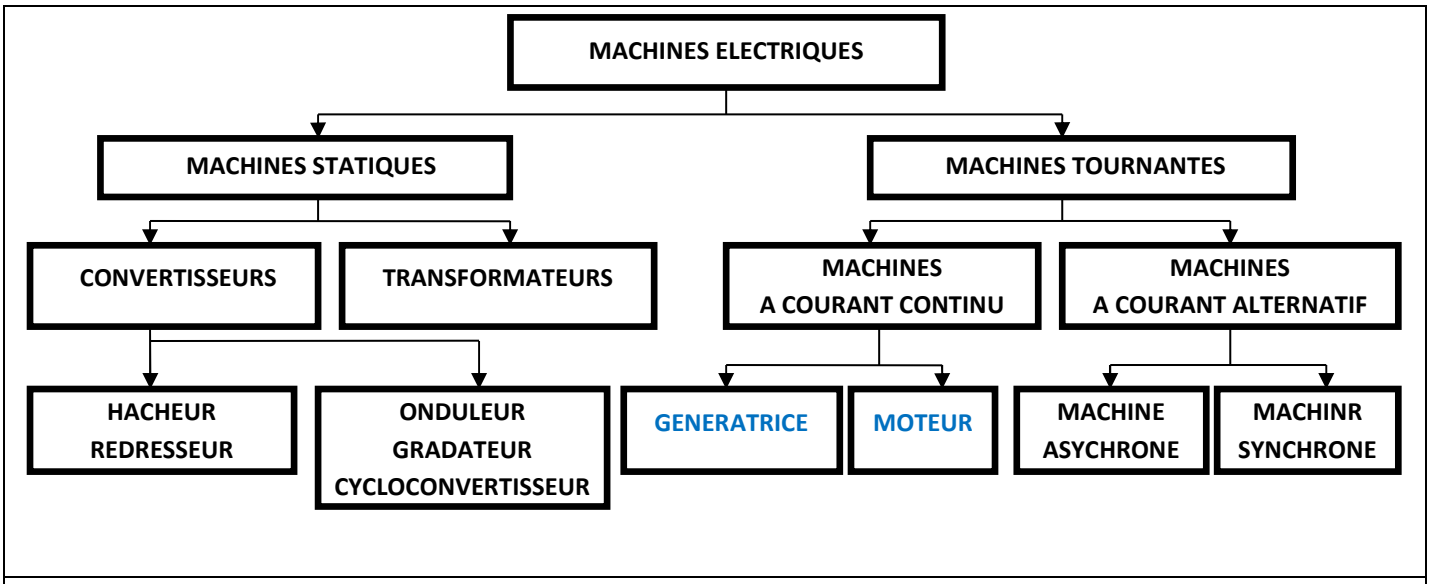


Fig.1 : Classification des machines électriques

Ce chapitre sera réservé à l'étude des machines à courant continu (fonctionnement en moteur).

2. Constitution et principe de fonctionnement

Toute machine à courant continu comporte deux circuits magnétiques, appelés **stator** (partie fixe) et **rotor** (partie mobile).

Dans le cas du moteur à courant continu le stator, aussi appelé inducteur, crée un champ magnétique B. Le rotor, aussi appelé induit, est alimenté en courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ B et sont soumis alors à la force de Laplace.

$$\overrightarrow{dF} = I\overrightarrow{dl} \wedge \overrightarrow{dB}$$

C'est cette force qui va faire tourner le rotor en créant un couple moteur comme c'est illustré sur la figure ci-dessous :

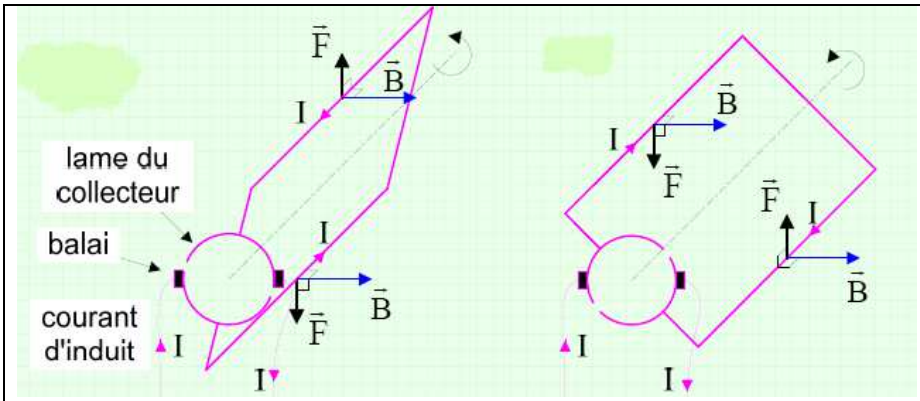


Fig.2 : Principe physique du moteur à courant continu

La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement.

2.1. Stator du moteur courant continu

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit (voir figure 3 ci-dessous). Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant.
Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique B appelé « champ inducteur ». L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor.

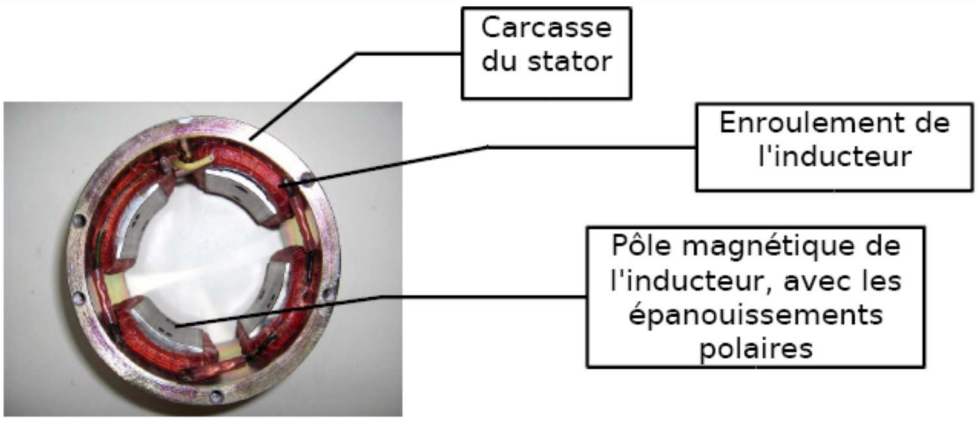


Fig.3 : Stator d'une machine à courant continu

Le pôle inducteur est feuilleté pour réduire le plus possible les pertes fers qui sont les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.
Le moteur illustré sur la figure 3 possède 2 paires de pôles inducteurs (Nord – Sud). Les lignes de champ magnétique vont du pôle Nord vers le pôle Sud.
La configuration des pôles est donnée pour un sens du courant inducteur. Si le courant est inversé, le pôle Sud devient un pôle Nord et inversement. C'est une possibilité pour inverser le sens de rotation du moteur.

2.2. Rotor du moteur courant continu

Fig.4 : Rotor d'une machine à courant continu

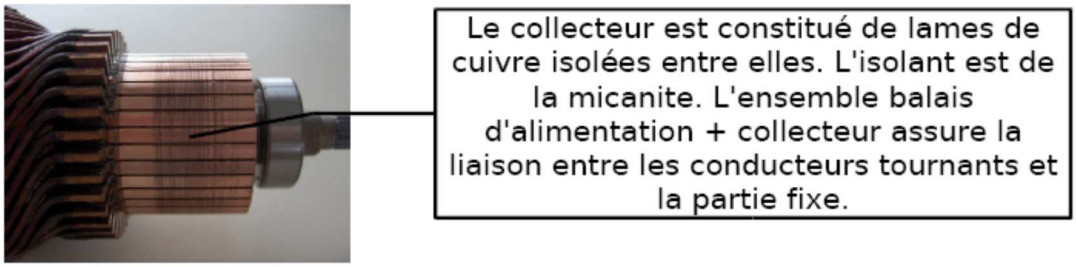


Fig.5 : Collecteur d'une machine à courant continu

Chaque lame du collecteur est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante. Une section est un ensemble de conducteurs qui passent, dans les encoches du rotor (voir figure 6 ci-dessous), sous un pôle Sud et sous un pôle Nord créés par le champ inducteur.

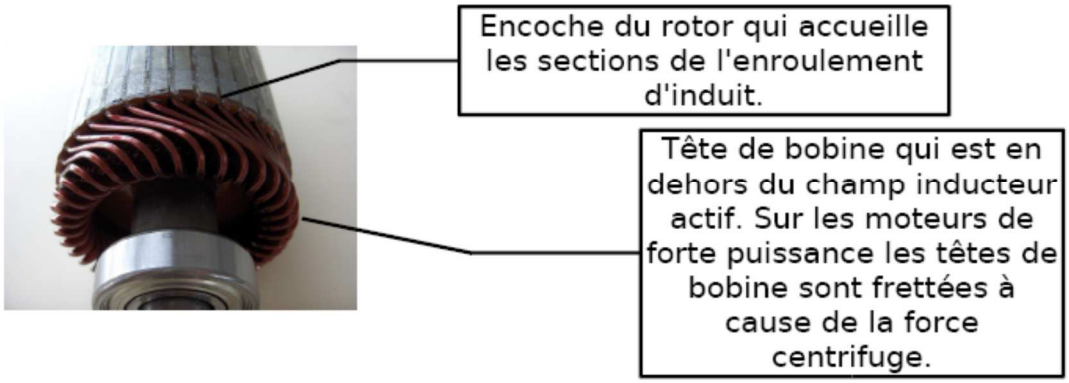


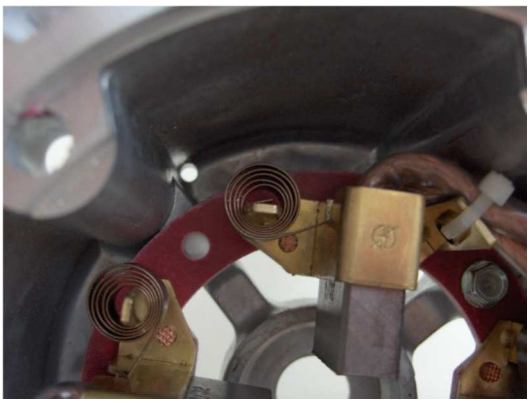
Fig.6 : Encoches du rotor d'une machine à courant continu

2.3. Balais et porte balais

Le Balais est à base de graphite, ni trop dur, ni trop tendre.

Le porte balais est reliée électriquement par une tresse conductrice au câble d'alimentation.

Le système à ressort assure une pression constante du balais sur le collecteur. Certains moteurs possèdent un capteur qui informe de l'usure du balais.



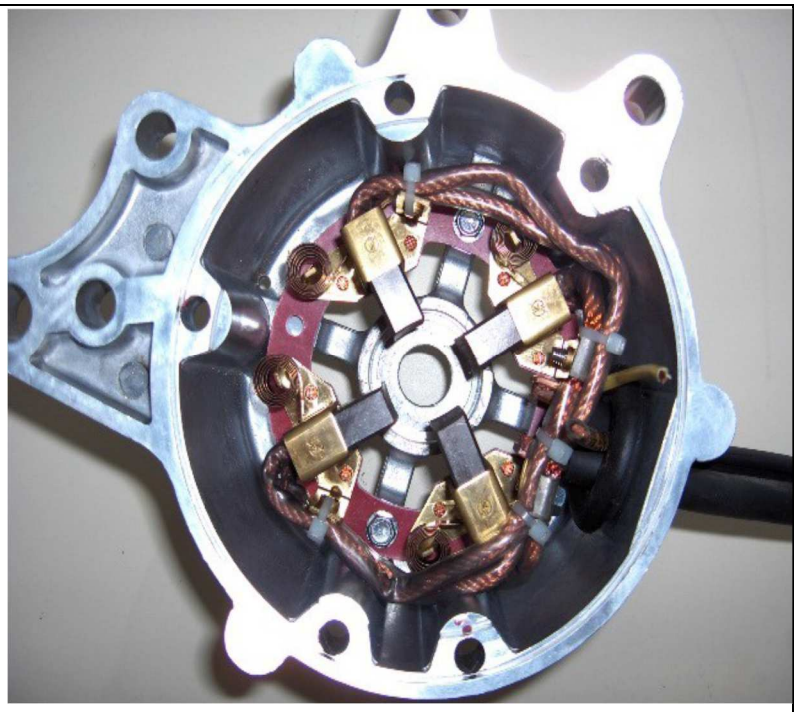
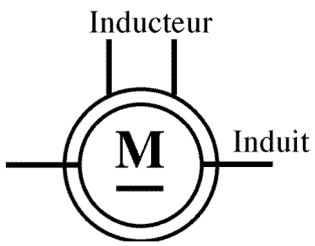


Fig.7 : Système Balais et porte balais d'une machine à courant continu

2.4. Symboles



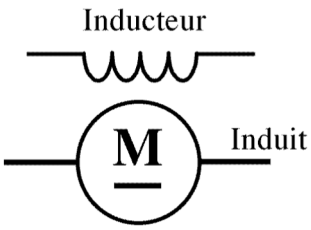


Fig.8 : Symboles

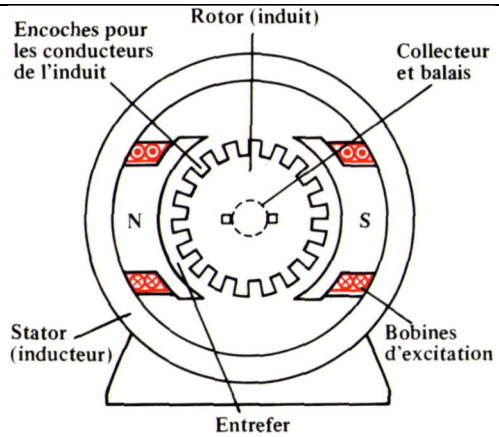
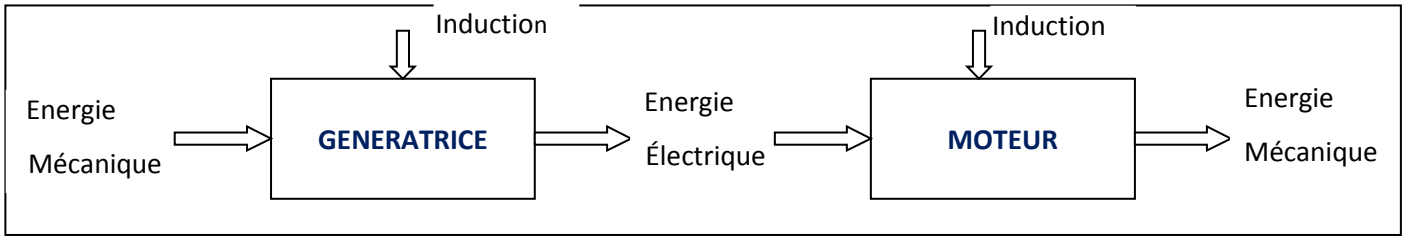


Fig.9 : Constitution : Résumé

3. Réversibilité de la machine a courant continu



- Si l'induit est entraîné, la machine fournit de l'énergie électrique (fonctionnement en génératrice).
- Si l'induit est alimenté, la machine fournit un couple moteur (fonctionnement en moteur).

4. Les différents types de machines à courant continu

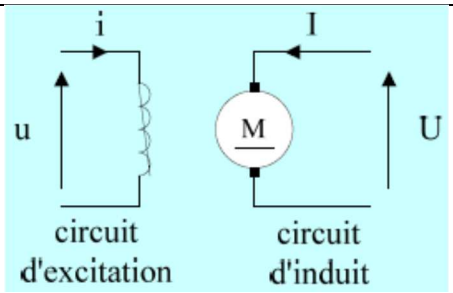


Fig.10 : Moteur à excitation indépendante

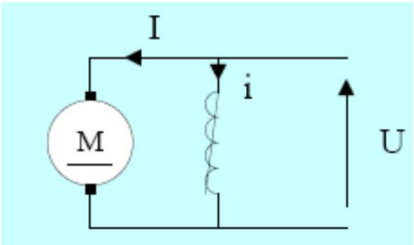


Fig.11 : Moteur à excitation shunt (excitation en dérivation)

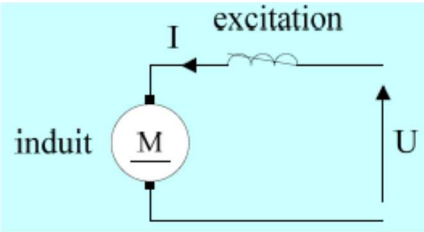


Fig.12 : Moteur à excitation en série

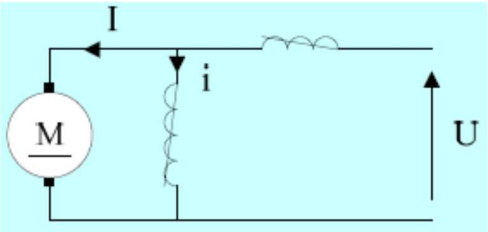


Fig.13 : Moteur compound (excitation composée) : Montage courte dérivation

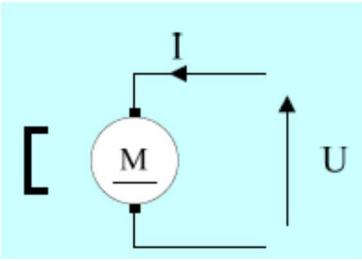
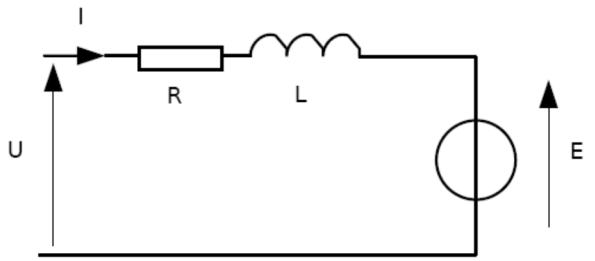


Fig.14 : Moteur à aimant permanent

5. Etude Electrique du moteur

5.1. Modèle équivalent de l'induit



- R : C'est la résistance interne totale : câble, balais, lame de collecteur et enroulement d'induit. La résistance s'exprime en Ω.
- L : C'est l'inductance de l'enroulement d'induit. Elle intervient dans les régimes transitoires d'alimentation du moteur. L'inductance s'exprime en Henri (H).
- L/R : la constante de temps électrique du moteur à courant continu. Elle intervient pour déterminer les limites de fréquence lors d'une alimentation du moteur par une commande électronique de type hacheur.

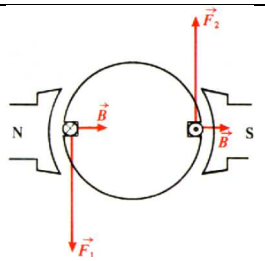
5.2. Force contre-électromotrice E

Une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday. Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.c.e.m. E :

$\mathbf{E = \frac{p}{a} Nn\Phi}$	avec: - p : Le nombre de paires de pôles - a : Le nombre de paires de voies d'enroulement : Ce paramètre dépend de l'exécution du bobinage de l'induit. - N : Le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires) - Φ : flux maximum à travers les spires en Wb - n : vitesse de rotation (en tr/s)

A flux constant, $\mathbf{E = K_v n}$ avec K_v : Constante de vitesse.

5.3. Couple électromagnétique



Pour une spire : les deux brins d'une spire placée dans un champ magnétique, subissent des forces de Laplace $\vec{F_1}$ et $\vec{F_2}$ formant un couple de force tel que : $\vec{F_1} = -\vec{F_2} = I\vec{l} \wedge \vec{B}$

Donc :

$$T_{em1spire} = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$$

Couple électromagnétique: $T_{em} = K\Phi I$ en (N.m)

K : est la même constante que dans la formule de la f.c.e.m. $\mathbf{E = K\Phi n}$

A flux constant : $\mathbf{T_{em} = K_c I}$ avec K_c : Constante de couple.

5.4. Loi d'Ohm et puissances

D'après le modèle équivalent du moteur à courant continu :

- En régime permanent : $\mathbf{U = E + RI}$
- En régime transitoire : $\mathbf{U = E + RI + L\frac{di}{dt}}$
- Puissance électromagnétique : $\mathbf{P_{em} = EI = T_{em}\Omega}$
- Puissance absorbée sur le réseau : $\mathbf{P_a = UI}$
- Puissance utile : $\mathbf{P_u = T_u\Omega}$

Remarque

- On retrouve la relation $T_{em} = K\Phi I$, En effet : $\mathbf{E = K\Phi\Omega}$ donc $EI = K\Phi\Omega I = T_{em}\Omega \rightarrow T_{em} = K\Phi I$

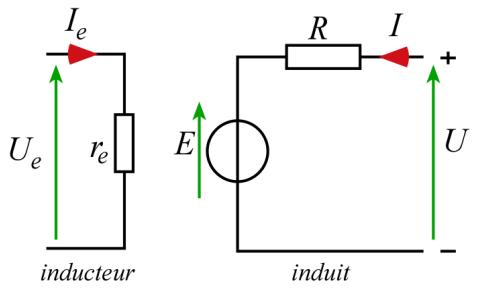
5.5. Les différentes pertes

Pertes	Pertes magnétiques P_{fer}	Pertes joules P_J	Pertes mécaniques $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le fer.	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
Remèdes	Utilisation de matériaux à cycles d'hystérésis étroits et feuilletage de l'induit.	Eviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

On définit alors les pertes dites constantes ou collectives. C'est à dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes. $P_c = P_{fer}+P_{méca}$

6. Moteur à excitation indépendante

6.1. Modèle équivalent



Les équations caractéristiques sont les suivantes :

$$U = E + RI$$

$$T_{em} = K\Phi I$$

$$E = K\Phi\Omega$$

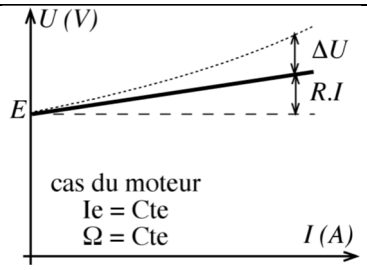
- Il faut deux alimentations : une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit.
- Les grandeurs qui déterminent le fonctionnement du moteur sont : E, U, I et Φ.

6.2. Chute de tension et réaction magnétique d'induit

La résistance du bobinage provoque une légère chute de tension dans l'induit : **R.I**

Le courant qui circule dans l'induit créé un flux indésirable de sorte que le flux total en charge $\Phi_{Charge}(I_e, I) < \Phi_{Vide}(I_e)$. Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire : c'est la **réaction magnétique d'induit**.

$$E = U - RI - \Delta U$$



- Pour annuler la réaction magnétique d'induit, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit : on dit que **la machine est compensée**. C'est souvent le cas.
- Le système balais-collecteur provoque également une légère chute de tension, souvent négligée.

6.3. Vitesse de rotation

La force contre électromotrice s'exprime par la même relation que pour la génératrice :

$$E = \frac{p}{a} Nn\Phi$$

$$n = \frac{E}{\frac{p}{a}N\phi} \quad \text{or} \quad E = U - RI \Rightarrow n = \frac{U - RI}{\frac{p}{a}N\phi}$$

Remarque : Lorsque le flux inducteur s'annule, la vitesse tend vers l'infini (**Emballement du moteur**). En conséquence, il ne faut jamais alimenter l'induit d'un moteur à courant continu sans l'existence d'un courant d'excitation.

6.4. Démarrage du moteur à courant continu :

Le courant absorbé par un moteur à courant continu est donnée par la loi d'Ohm :

$$U = E + RI \quad \text{soit} \quad I = \frac{U - E}{R}$$

Ce courant dépend de la f.c.e.m étant donné que U et R sont deux constantes.
Entre la mise sous tension du moteur et son décollage, La vitesse est nulle donc la f.c.e.m aussi ; le courant n'est limité que par R.

D'où : $I_d = \frac{U}{R}$

Exemple : Moteur U=240V ; R=1Ω ; P=3.6KW

$$In = \frac{3600}{240} = 15A \Rightarrow I_d = \frac{240}{1} = 240A \mapsto I_d = 16In$$

- **I_d est très grand.**
- **Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I_d diminue jusqu'à I_n.**
- **Au démarrage en charge**, il faut que $T_d > T_{dc}$: il faut donc un courant de décollage $I_d \approx \frac{T_d}{K\Phi} > \frac{T_{dc}}{K\Phi}$, On constate qu'étant donné la pointe de courant de démarrage, le moteur à excitation indépendante peut démarrer en charge.

☞ **Solutions pour limiter le courant**

- **Première solution**

Pour limiter ce courant à une valeur comprise entre 1 et 2 fois l'intensité nominale (on général : **1,5 I_n**), on monte une résistance en série avec l'induit. Le courant au moment de démarrage est alors de :

$$I_d = \frac{U}{R + Rh} \Rightarrow Rh = \frac{U}{I_d} - R$$

Pour l'exemple précédent, si on veut limiter le courant de démarrage à $I_d = 1{,}5I_n = 22{,}5A$.

$$Rh = \frac{240}{22{,}5} - 1 \Rightarrow Rh = 9{,}67\Omega$$

Le rhéostat de démarrage comporte, en général, plusieurs plots de façon à diminuer la résistance Rh au fur et à mesure que la vitesse augmente.

- **Deuxième solution**

On démarre sous une tension d'alimentation réduite. Dans notre exemple : $U_d = R.I_d = R.1{,}5.I_n = 22{,}5\ V$

6.5. Procèdes de démarrage

- **Principe**

On cherche, par une division convenable de la résistance totale du rhéostat de démarrage, à maintenir la valeur I du courant entre un maximum I_{max} et un minimum I_{min}.

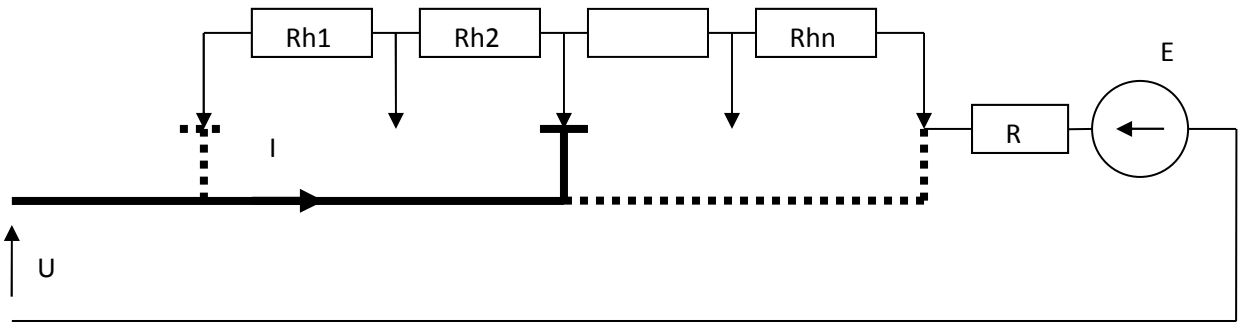


Fig.15 : Principe de démarrage d'un moteur à courant continu

L'équation des tensions est la suivante :

$$U = \frac{p}{a} Nn\phi + (R + Rh)I \Rightarrow n = \frac{U}{\frac{p}{a} N\phi} - \frac{(R + Rh)I}{\frac{p}{a} N\phi}$$

n(I) est donc une droite de pente égale à $-\frac{(R + Rh)}{\frac{p}{a} Nn\phi}$

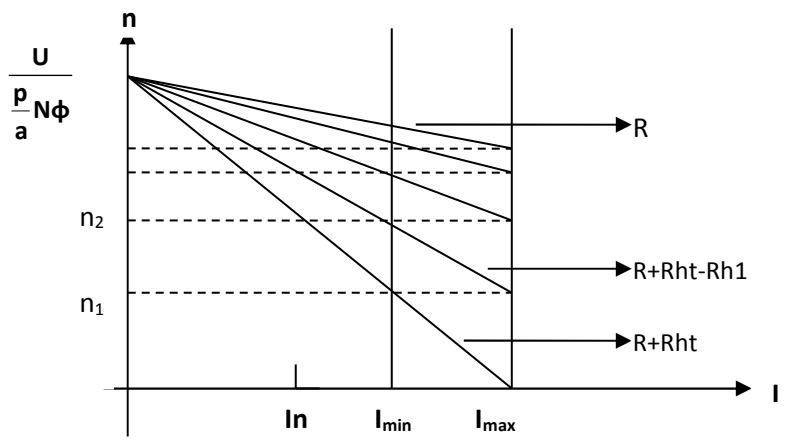


Fig.16 : Courbes de n(I)

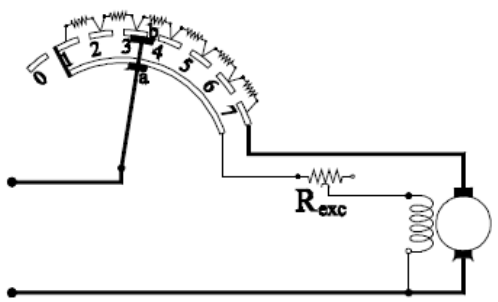


Fig.17 : Rhéostat de démarrage n(I)

La droite correspondant à (R+Rht) doit être telle que $I=I_{max}$ pour n=0. Quand la vitesse atteint n_1, $I=I_{min}$, on élimine alors Rh1. I reprend la valeur I_{max}, le courant décroît jusqu'à I_{min} pour $n=n_2$. Et pour $n=n_2$ on ramène le courant à I_{max} en éliminant Rh2 et ainsi de suite.

Calcul de Rhi :

Si l'on faisait varier la résistance Rh du rhéostat de façon continue de manière à maintenir I constant, n=f(Rh) serait un segment de droite. En effet :

$$E = U - (R + Rh)I = \frac{p}{a} nN\phi \Rightarrow n = \frac{U - (R + Rh)I}{\frac{p}{a} N\phi}$$ Avec : U=Cste ; I=Cste ; Φ=Cste.

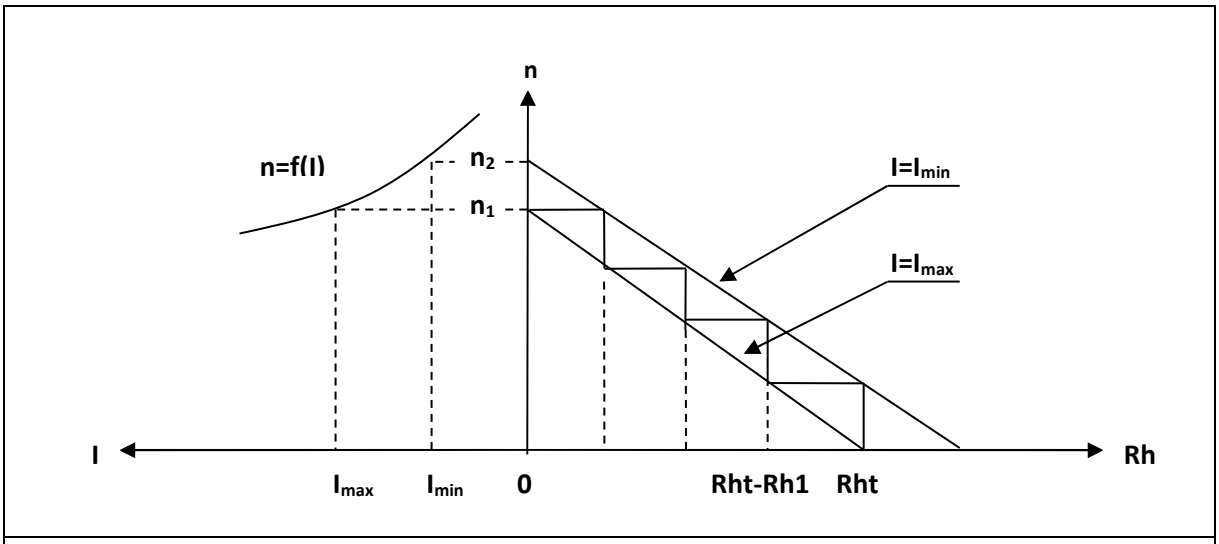


Fig.18 : Courbes n(Rh)

Autrement :

Au décollage : $I_d = Imax = \frac{U}{Rt} \Rightarrow Rt = \frac{U}{Imax}$

Analysons le passage du 1° au 2° plot :

- Immédiatement avant : $U = E + Rt.I_{min}$
- Immédiatement après : $U = E + (Rt-Rh1).I_{max} = E + R_1.\ I_{max}$

Soit $Rt.I_{min} = R1.I_{max}$ ⇨ $R1 = \frac{Imin}{Imax}Rt$

De même : $R2 = \frac{Imin}{Imax}R1 = \frac{Imin}{Imax} * \frac{Imin}{Imax}Rt$ soit $R2 = \left(\frac{Imin}{Imax}\right)^2 * Rt$

On peut généraliser cette formule en écrivant :

$Rt = Ra.\alpha^{n-1}$ Avec n : nombre de plots.

α = (Imax/Imin)

Ra : Résistance de l'induit.

Rt = (U/Imax)

6.6. Fonctionnement à vide

A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle.

$I_0 << I_n \Rightarrow RI_0 << U$ et finalement $\Omega_0 = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi}$.

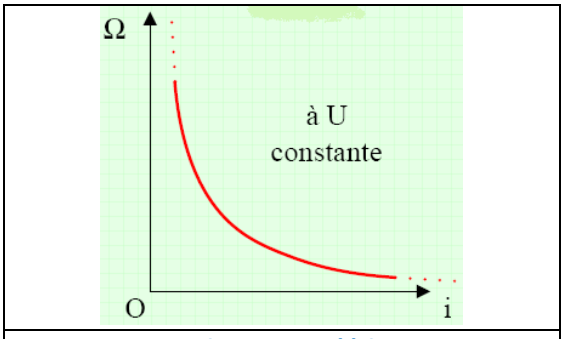


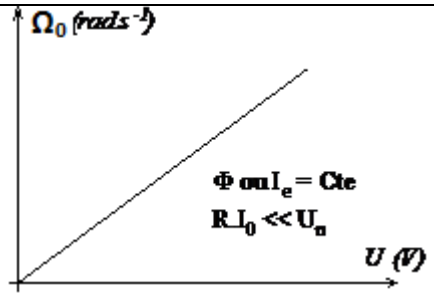
Fig.19 : Caractéristique Ω(i) à U constante

La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur Φ.

Attention

- à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation I_e lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. En effet si $I_e \rightarrow 0$ alors $\Phi \rightarrow 0$ et $\Omega_0 \rightarrow \infty$.
- En charge, si Φ tend vers 0, le couple électromagnétique aussi et il arrivera un moment où le couple sera inférieur au couple résistant et la machine s'arrêtera.

- **Fonctionnement à flux constant**

$\Omega = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi} = K_2 U$ avec $K_2 = \frac{1}{K\Phi}$	

6.7. Fonctionnement en charge

Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

$$\Omega = \frac{E}{K\Phi} \Rightarrow \qquad \Omega = \frac{U - RI}{K\Phi} = K_2(U - RI) \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K\Phi} = cte$$

A flux constant, la vitesse dépend alors de :

- La tension d'alimentation **U** ;
- L'intensité du courant **I** imposée par le moment du couple résistant.

La tension U reste grande devant R.I et en conséquence la vitesse de rotation dépend essentiellement de la tension d'alimentation U et varie très peut en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.

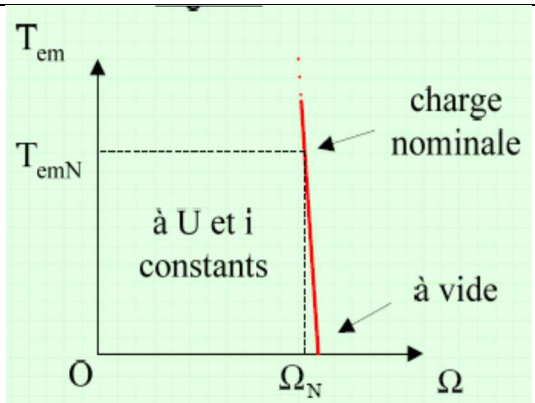
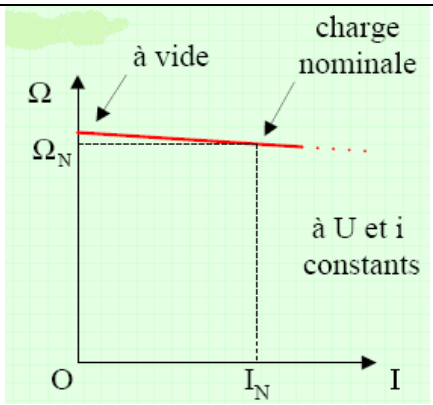
	

Fig.20 : Caractéristique mécanique du MCC	Fig.21 : Caractéristique Ω(I) en charge à U et i constants

6.8. Mode de fonctionnement usuel

L'alimentation de l'induit sous tension réglable présente deux avantages :

- Mise en vitesse progressive avec suppression de la surintensité.
- Vitesse largement variable.

C'est le mode de fonctionnement utilisé lorsque la vitesse doit varier.

Conclusion

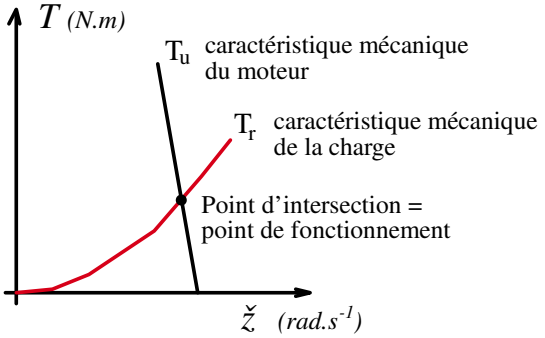
- La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation $\Omega \approx \frac{U}{K\Phi}$.
- La charge impose la valeur du courant $I \approx \frac{T_r}{K\Phi}$.

6.9. Point de fonctionnement

La charge oppose au moteur un couple résistant T_r. Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile T_u de telle sorte que :

$$T_u = T_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.



6.10. Bilan de puissance

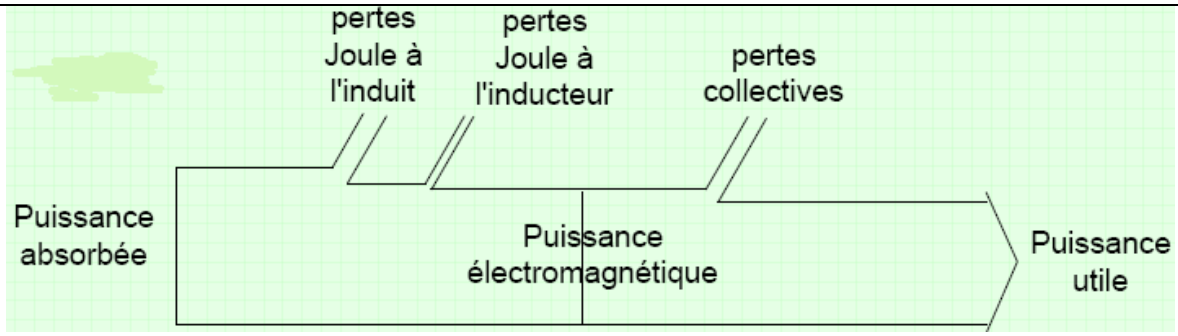
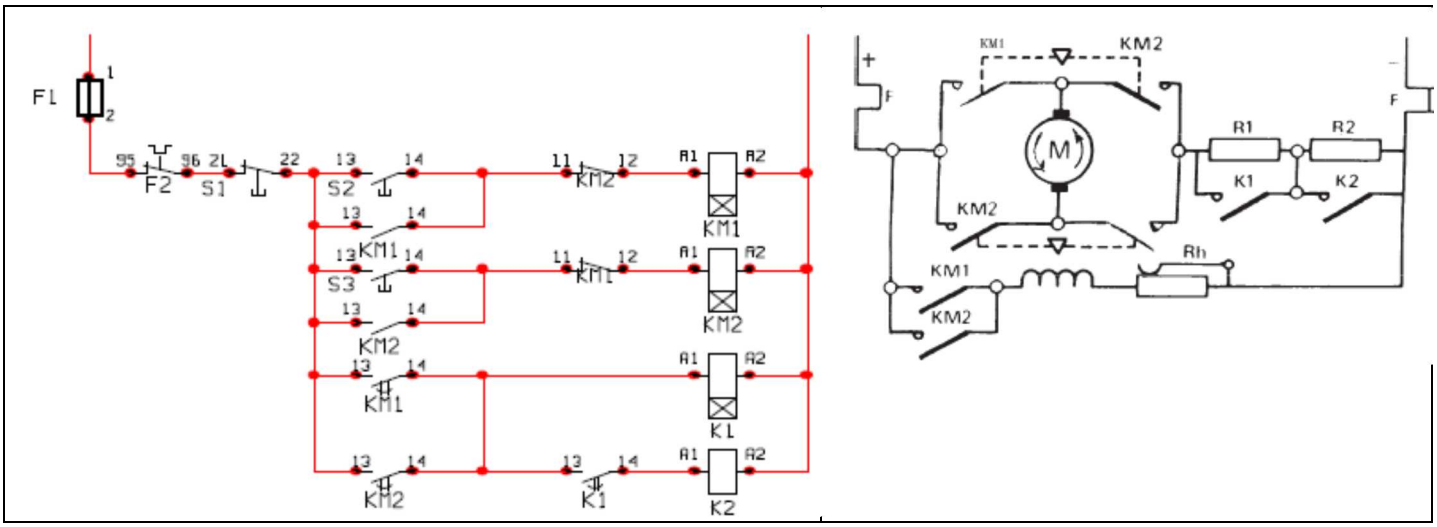


Fig.22 : Arbre de puissances

- **Puissance absorbée : $UI + U_e i_e$**
- **Pertes joules :**
  1. **A l'induit : RI^2**
  2. **A l'inducteur ri^2 ou $U_e i_e$**
- **Puissance électromagnétique $P_{em} = EI = T_{em}\Omega$**
- **Pertes collectives : pertes fer et pertes mécaniques**
- **Puissance utile : $T_u\Omega$**

Remarque : Si le moteur est à aimants permanents : U_e, i_e et P_{je} n'existent pas

- **Rendement** $\eta = \dfrac{P_u}{P_a} = \dfrac{T_u.\Omega}{U.I + P_{je}}$

6.11. Démarrage semi-automatique d'un MCC à excitation shunt