Chapitre 3 Machines électriques à courant continu (MCC)

1. Introduction :

La machine à courant continu est une machine électromagnétique qui peut se fonctionner, soit comme un moteur (transforme l'énergie électrique en énergie mécanique) ou bien comme une dynamo c'est-à-dire une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, donc c'est l'inverse de moteur.

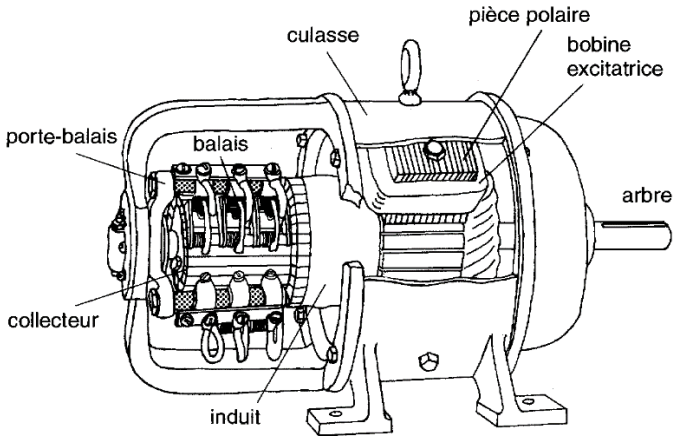


Figure (I- 1) : schémas d'une machine à courant continu

La machine à courant continu est symbolisé par :

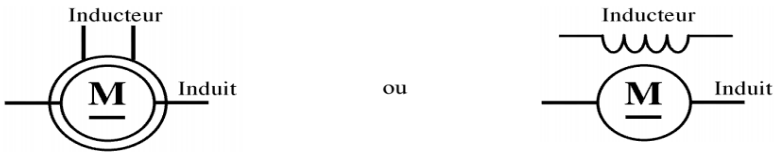
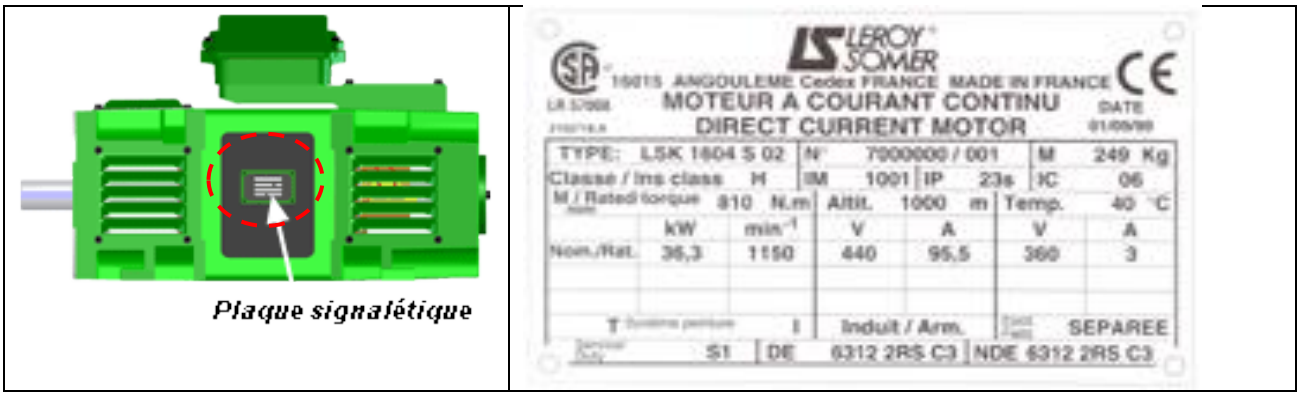


Figure (I-2) : Les symboles d'une machine à courant continu.

2. Plaques signalétiques.

Les caractéristiques électriques des moteurs à courant continu sont portées sur une plaque signalétique fixée sur la carcasse.



E*léments d'identification d'un moteur à courant continu*

La liste ci-dessous donne les éléments susceptibles de figurer sur la plaque signalétique.

LSK	*Série*	**IP 23S**	*Indice de protection*	**V**	*Tension d'inducteur*
160	*Hauteur d'axe*	**IP 23S**	*Indice de refroidissement*	**A**	*Intensité d'inducteur*
4	*Nombre de pôles*	**Mnom**	*Moment nominal*	**DE**	*Drive end, roulement côté entrainement*
S	*Symbole de carter*	**Altit**	*Altitude de fonctionnement maximale*	**NDE**	*Non drive end, Roulement côté opposé à l'entraînement*
02	*Indice constructeur*	**Temp**	*Température d'ambiance de fonctionnement maximale*	**g***	*Masse de graisse à chaque regraissage (en g)*
T	*Repère d'imprégnation*	**Nom**	*Caractéristiques nominales*	**h***	*Périodicité de graissage (en heures)*
I	*Système de peinture*	**kW**	*Puissance*		** pour roulements non étanches*
Date	*Date d'expiration*	**N min^{-1}**	*Nombre de tours par minute*		
N°	*N° série du moteur*	**V**	*Tension d'induit*		
/ 001	*N° d'ordre dans la série*	**A**	*Intensité d'induit*		
M..kg	*Masse*				
Classe H	*Classe d'isolation H*				
IM 1001	*Position de fonctionnement*				

Le type du moteur : série : LSK hauteur d'axe :160 Nombre de pôles : 4 Stator de type :S Indice constructeur : 02	LSK 1604 S 02	Le numéro de série suivi du numéro d'ordre dans la série	N° 70000000 / 001
		La date d'expédition	01/06/99
		La masse	M 249 Kg
La classe d'isolation	Classe /ins class H	La position de fonctionnement	IM 1001
L'indice de protection	IP 23s	L'indice de refroidissement	IC 06
Le couple nominal	810 Nm	L'attitude maxi de fonctionnement	Altit 1000 m
La température ambiante maxi de fonctionnement	Temp. 40 °	La puissance nominale La vitesse nominale	36,3 kW 1150 tr.min^{-1}
La tension nominale de l'induit	V 440	La tension nominale de l'inducteur	V 360
L'intensité dans l'induit	A 99,5	L'intensité dans l'inducteur	A 3
L'indice d'imprégnation de peinture	T système peinture : I	Des indications relatives aux roulements employés coté entrainement coté opposé à l'entrainement	DE 6312 2RS C3 NDE 6312 2RS C3

3. Constitution du moteur

3.1. Le principe physique fondamental

Tous les moteurs électriques sont basés sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout moteur 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 Bs. Le rotor, aussi appelé induit, est alimenté par un courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ Bs, or le physicien Laplace découvrit que le conducteur est soumis à une force F = Bs^I (^ = produit vectoriel entre les deux vecteurs). C'est cette force qui va faire tourner le rotor et créer le couple moteur.

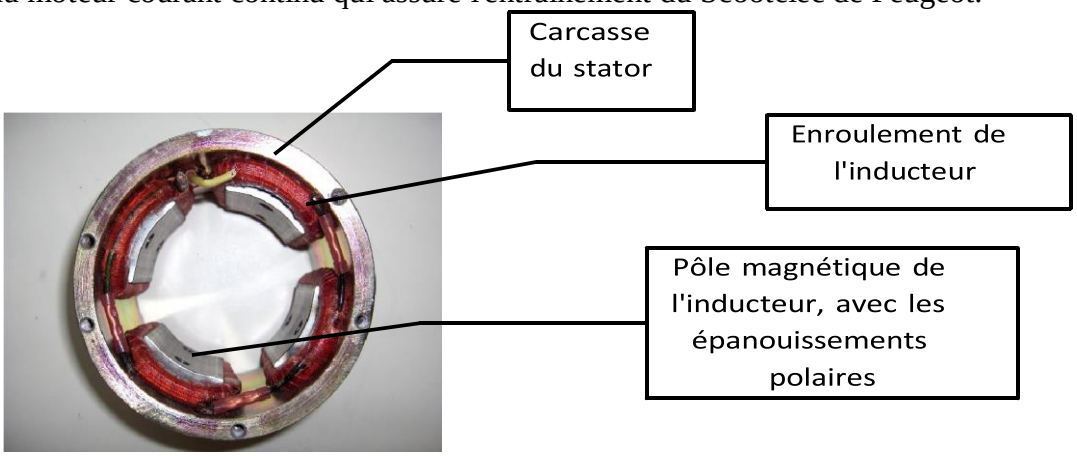
La constitution technologique du moteur matérialise ce principe de fonctionnement.

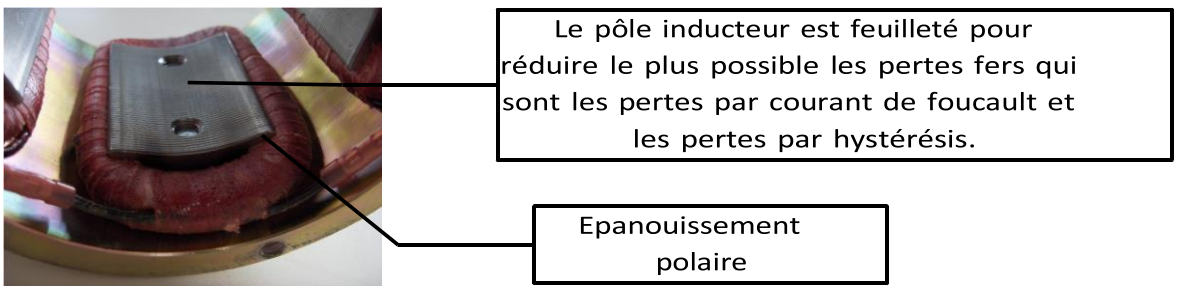
3.2. Stator du moteur courant continu

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électro-aimant.

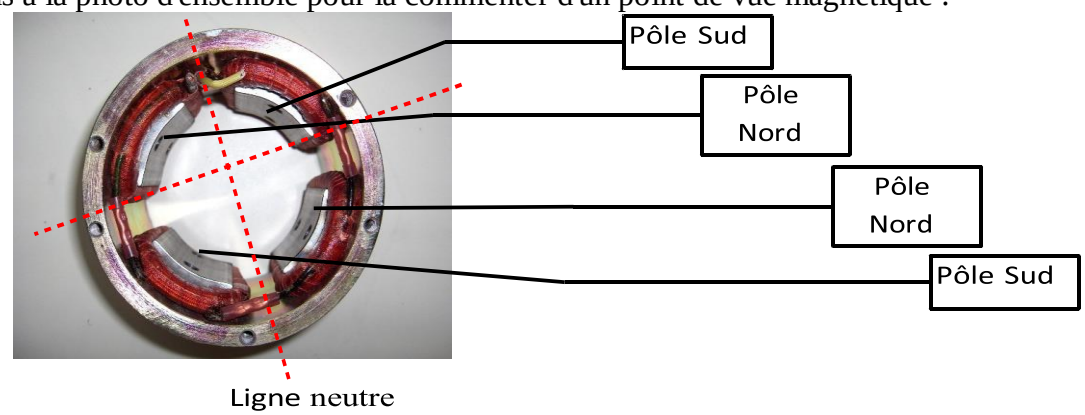
Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé « champ inducteur » (Bs). L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique (Φ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques.

Illustrons ce vocabulaire avec une photo.
Il s'agit du moteur courant continu qui assure l'entraînement du Scootelec de Peugeot.





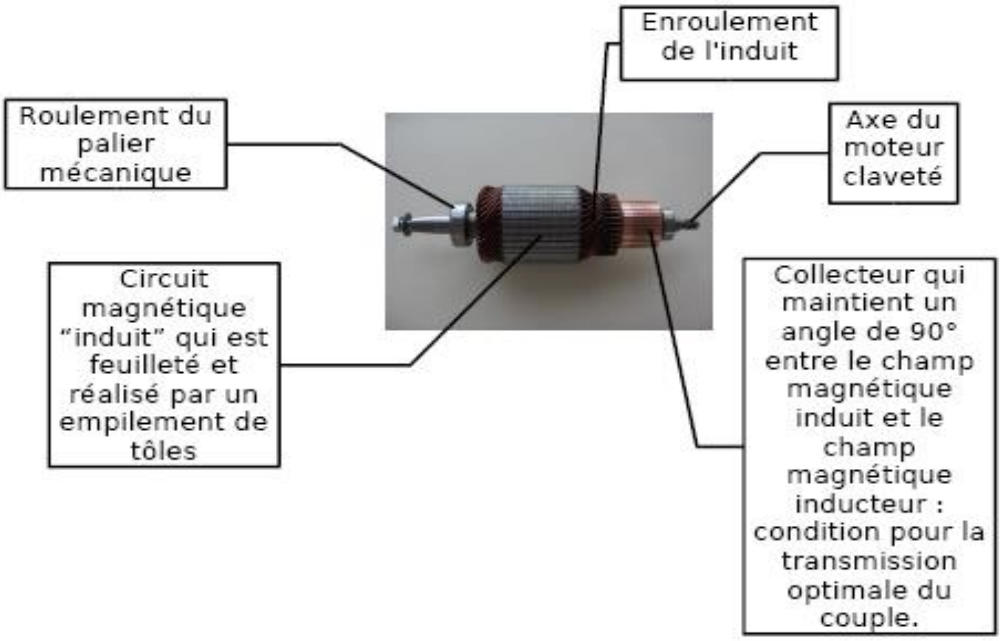
Revenons à la photo d'ensemble pour la commenter d'un point de vue magnétique :

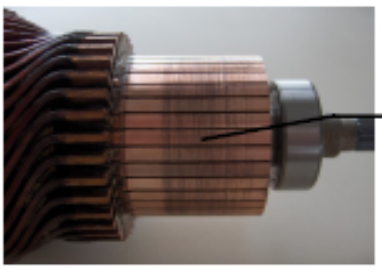


Ce moteur possède 2 paires de pôles inducteurs (Nord – Sud) pour mieux répartir le flux magnétique dans la machine. Les lignes de champ magnétique vont du pôle Nord vers le pôle Sud. La configuration des pôles est donnée pour un sens du courant inducteur. Si le courant est inversé, le pôle Sud devient un pôle Nord et inversement. C'est une possibilité pour inverser le sens de rotation du moteur, mais elle est peu utilisée.

Lorsque la spire, ou section, de l'induit (paragraphe suivant) est sur la « ligne neutre », les forces électromotrices induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en court-circuit par les balais.

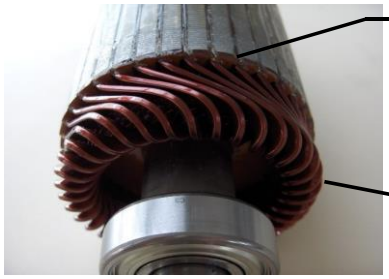
1.1. Rotor du moteur courant continu





Le collecteur est constitué de lames de cuivre isolées entre elles. L'isolant est de la micanite. L'ensemble balais d'alimentation + collecteur assure la liaison entre les conducteurs tournants et la partie fixe.

Chaque lame 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 sous un pôle Sud et sous un pôle Nord créeent par le champ inducteur. La section baigne dans le champ magnétique inducteur.

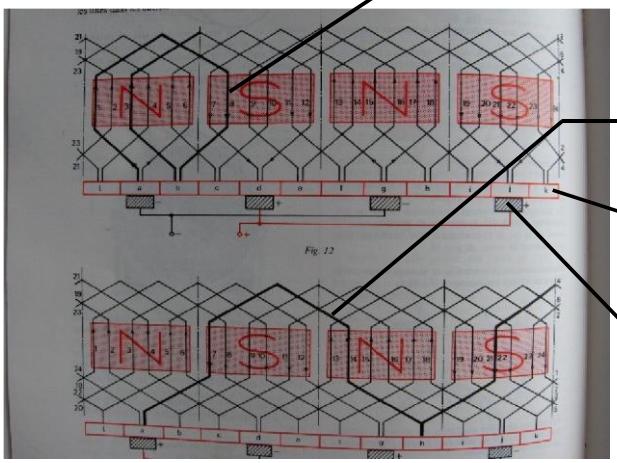


Encoche du rotor qui accueille les sections de l'enroulement d'induit.

Tête de bobine qui est en dehors du champ inducteur actif. Sur les moteurs de forte puissance les têtes de bobine sont frettées à cause de la force centrifuge.

Les deux figures ci-dessous représentent les deux types d'exécution des enroulements de l'induit.

Enroulement imbriqué



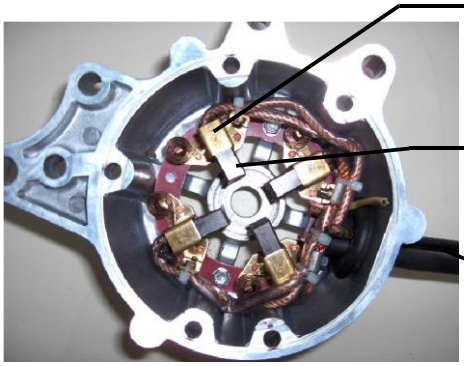
Enroulement ondulé

Lame du collecteur

Balais borne + de l'alimentation continue

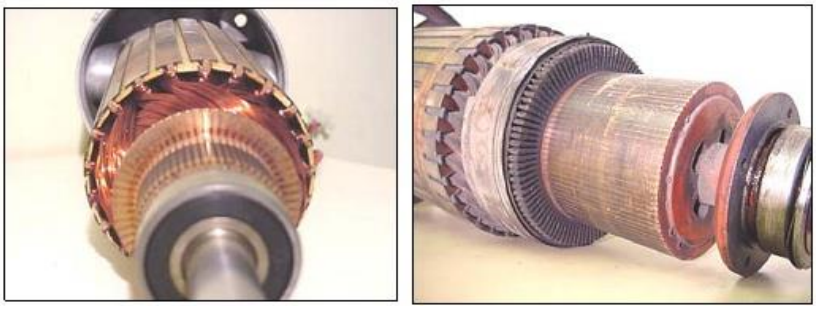
4. Balais et porte balais

Porte balais relié électriquement par une tresse conductrice au câble d'alimentation



Balais à base de graphite, ni trop dur, ni trop tendre

Câble d'alimentation en 16 mm ²



Le collecteur

Les balais et porte balais

2. Caractéristique de quelque machine électrique a courant continue

2.1. Génératrice à courant continue

2.1.1. Génératrice à excitation séparée

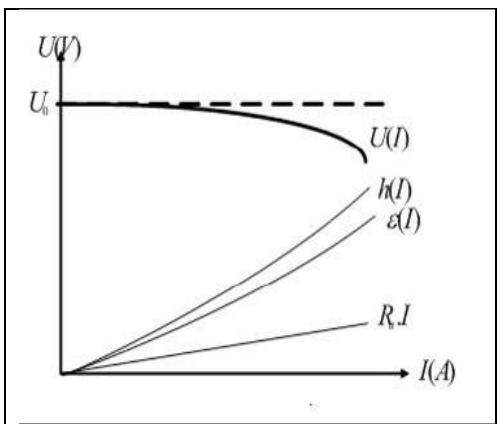
- *Caractéristique à vide (interne)*

La caractéristique à vide (interne) est E_0 = f(j) à une vitesse de rotation constante.
0n maintient la vitesse de rotation à sa valeur nominale, à l'aide de rhéostat d'excitation on varie le courant d'excitation j et on mesure la tension aux bornes de l'induit.
$E_0 = E_r$: f.e.m rémanente.
-Pour des valeurs d'excitations importantes, le circuit magnétique va se saturer et l'accroissement de la f.e.m sera moins vite que précédemment. E0 = f(j) présente donc un coude de saturation.

-à la saturation, même si on augmente l'excitation la f.e.m à vide E0 = constante

- *Caractéristique en charge*

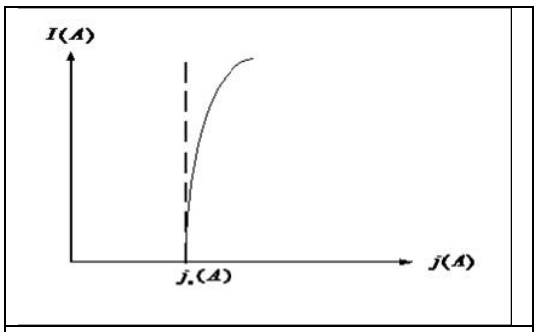
Courbe $U = f(I)$ à j et n constantes. On fait varier le courant à l'aide de la charge R et on relève la tension aux bornes de l'induit tout en maintenant la vitesse et l'excitation constante.
Pour un régime de fonctionnement en charge (pour I donné), la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit est donnée par $\varepsilon(I) = E_0 - E_{ch}$.
La loi des mailles appliquée à l'induit nous donne :
$U = E_0 - (\varepsilon(I) + R_a.I) = E_0 - h(I)$
Avec : $h(I) = \varepsilon(I) + R_a.I$: chute de tension totale de l'induit.
Lorsque le courant I croit, la tension U diminue, donc la courbe $U = f(I)$ est décroissante et s'incurve de plus en plus à cause de $\varepsilon(I)$.



Caractéristique en charge

➢ *Caractéristique de réglage*

Courbe $I = f(j)$ à $U = cte$ et $n = cte$.
On peut obtenir directement par l'expérience, les différentes valeurs de l'excitation permettant pour les différents courants d'induit, afin de maintenir la tension constante. L'allure est donnée ci-dessous.
Le courant $j0$ correspond au fonctionnement à vide.
Lorsque I augmente, la tension U diminue il faut augmenter le courant j (diminuer le rhéostat d'excitation) pour compenser la chute de tension totale de l'induit.

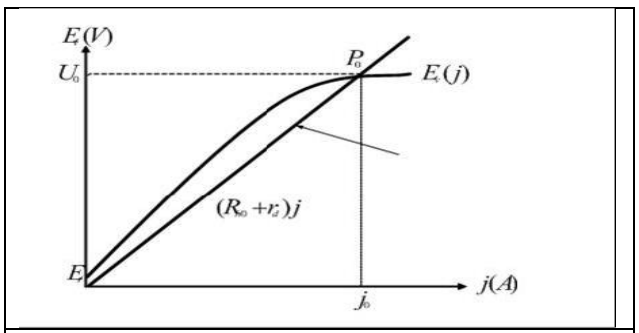


Génératrice à excitation shunt

2.1.2. Génératrice à excitation shunt

➢ *Fonctionnement à vide*

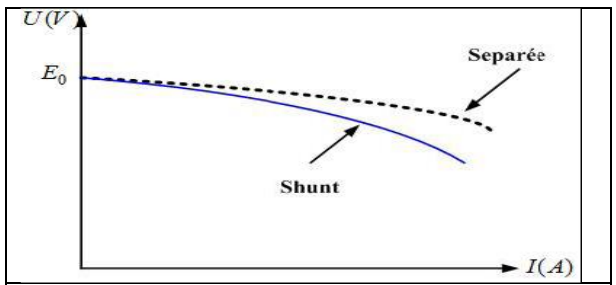
Tout d'abord on précise que E0 = f(j) ne dépend ni du mode d'excitation, ni du mode de fonctionnement, car elle représente la courbe d'aimantation du circuit magnétique.
Il est toujours recommandé de la relever en génératrice à excitation séparée.
L'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle, la tension à vide est U0 = E0 = (Rh+rd).j'



Point de fonctionnement d'une génératrice shunt

➢ *Caractéristique en charge*

Courbe U = f(I) à j et n constantes.
Chaque fois qu'on varie la charge, la tension U diminue ce qui a pour effet de diminuer le courant d'excitation. C'est pourquoi on diminue le rhéostat d'excitation afin de fixer le courant j.
$U = f(I)_{shunt}$ est plus tombente que $U = f(I)_{sep}$ car contrairement à l'excitation séparée car j n'est plus constant.



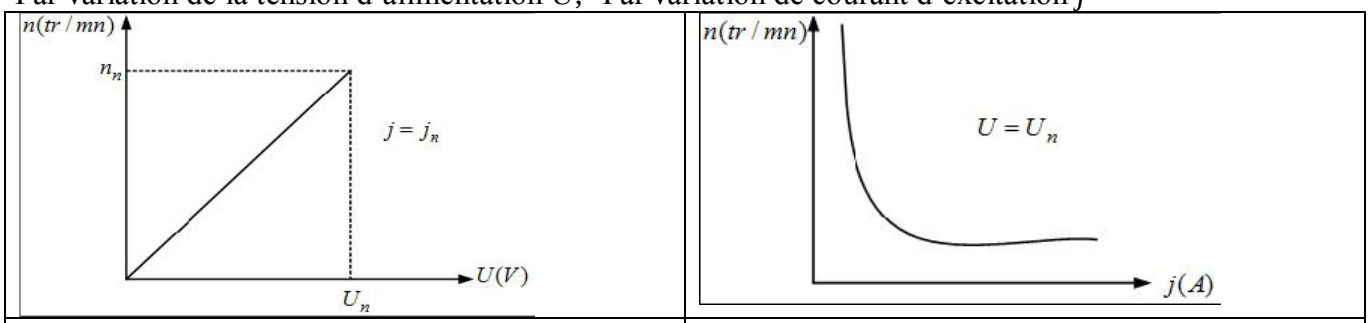
Caractéristique en charge

2.2. Moteurs à courant continu

2.2.1. Moteur à excitation indépendante alimenté sous une tension variable

➢ *Fonctionnement à vide*

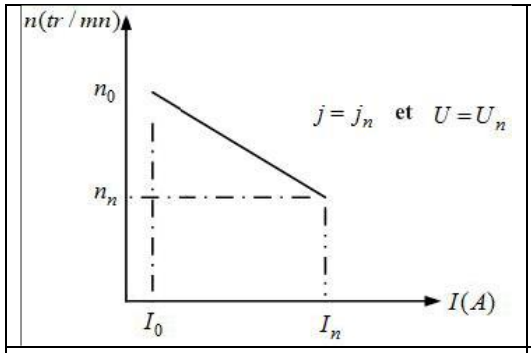
Le moteur n'entraine aucune charge mécanique. Le courant absorbe à vide est I_0. La variation de la vitesse se fait soit :
-Par variation de la tension d'alimentation U, -Par variation de courant d'excitation *j*



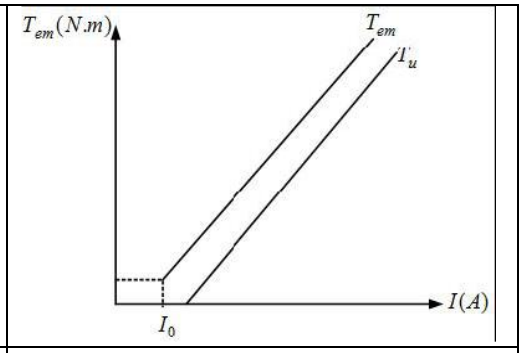
-Par variation de la tension d'alimentation U | -Par variation de courant d'excitation *j*

- *Fonctionnement en charge*

Dans ce cas, la tension d'alimentation de l'induit et le courant d'excitation sont réglés à leurs valeurs nominaux.
Caractéristique du couple L'excitation est constante, Le couple électromagnétique est proportionnel au courant induit.



Allure de la vitesse



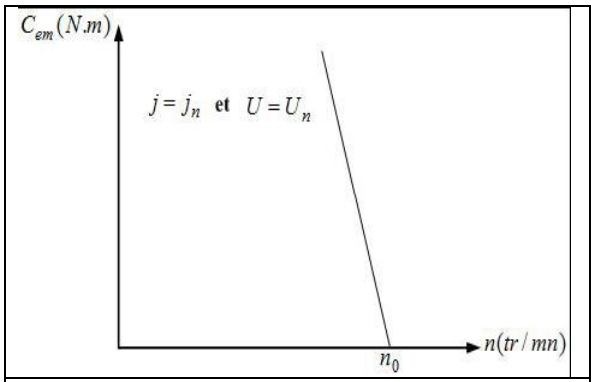
Allure du couple

- *Caractéristique mécanique*

Cette caractéristique représente la variation de couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation à j et U donnés.
Le moteur à excitation séparée est bien adaptée à une commande :

-En vitesse par action sur la tension d'induit qui est pratiquement proportionnelle à la vitesse de rotation à courant d'excitation constant

-En couple par action sur le courant d'induit

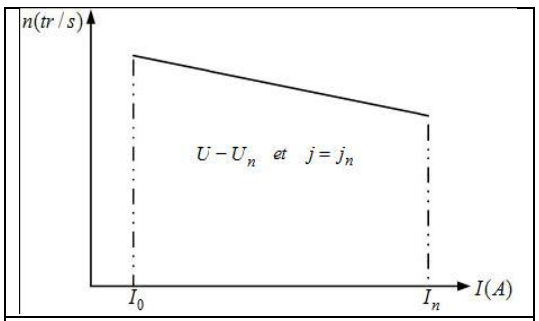


Caractéristique m´mécanique

2.2.2. *Moteur à excitation shunt alimenté sous une tension constante*

- *Caractéristique de la vitesse*

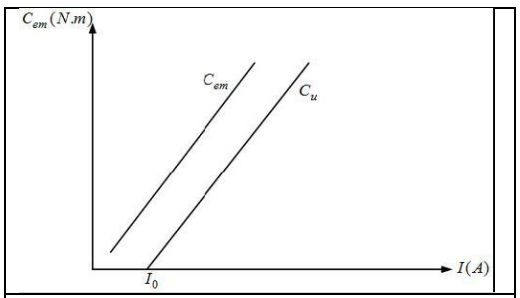
C'est la caractéristique qui d´écrit la variation de la vitesse de rotation en fonction du courant absorbé par l'induit en fixant la tension d'alimentation et le courant d'excitation à leurs valeurs nominaux.
Pour maintenir le flux constant, il faut augmenter Le courant d'excitation j lorsque I augmente, ce qui comme effet la diminution du rendement du moteur (à cause de l'augmentation des pertes par effet joule inducteur).



Caractéristique de la vitesse

- *Caractéristique du couple*

Si on maintient le flux constant, le couple électromagnétique est proportionnel au courant induit.



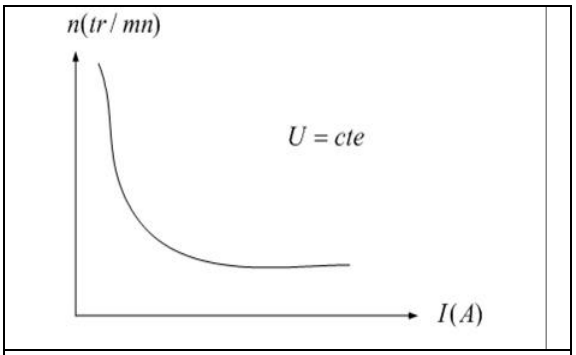
Caractéristique du couple

2.2.3. Moteur à excitation série alimenté sous une tension constante

Dans ce cas le courant I joue le rôle de courant inducteur et de courant induit.

- *Caractéristiques électromécaniques*

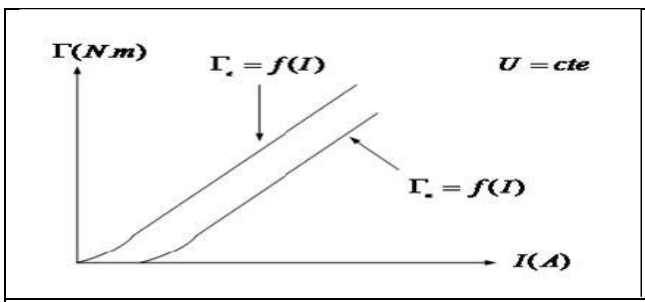
Caractéristique de la vitesse à U=cte.
On distingue deux zones de fonctionnement :
Pour les faibles valeurs du courant I, le circuit magnétique n'est pas saturé, la variation de la vitesse en fonction de courant est hyperbolique
Pour les fortes valeurs du courant I, le circuit magnétique est saturé, la variation de la vitesse en fonction de courant est linéaire décroissante.
On constate que si $I = 0$(Le moteur fonctionne à vidé), le moteur s'emballe ($n = \infty$).
Donc on ne doit jamais démarrer un moteur série à vide.



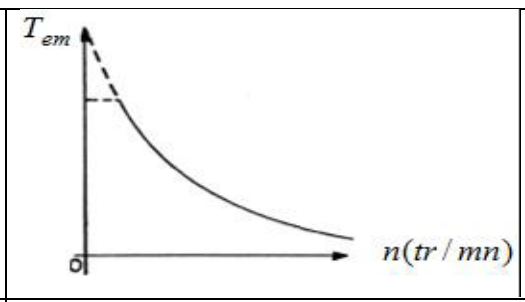
Caractéristique de la vitesse

- *Caractéristique de couple*

On sait que le couple électromagnétique est $C_{em} = K_e . I/2\pi$
-Si le circuit magnétique n'est pas saturé $C_{em} = K I^2$, c'est une variation parabolique en fonction du courant induit.
-Dans le cas de saturation $C_{em} = K'I$, c'est une variation linéaire en fonction de courant I.

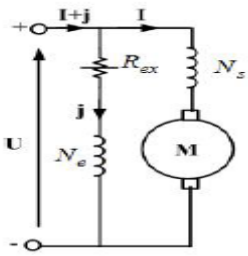


Caractéristique du couple



Caractéristique mécanique

2.2.4. Moteur à excitation composée



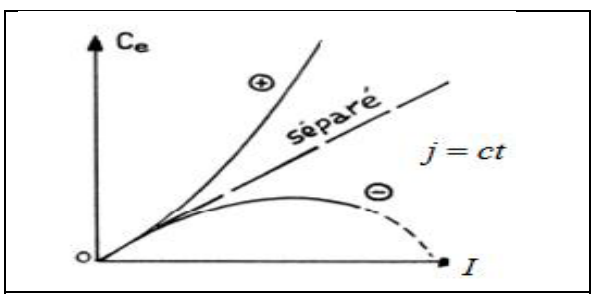
La force magnétomotrice totale est :

$$Ne.j' = Ne.j \pm Ns.I.$$

Le signe dépend de sens des enroulements :
-Montage additif, la f.m.m totale est : $Ne.j' = Ne.j + Ns.I$
-Montage soustractif, la f.m.m totale est : $Ne.j' = Ne.j - Ns.I$
Avec j'est le courant fictif qui circule dans l'enroulement parallèle et produit le même flux magnétique

- *Caractéristique de couple*

Dans le cas de montage additif, donc le couple électromagnétique est supérieur à celui d'un moteur à excitation séparée.
Si le montage est soustractif, le couple électromagnétique est inférieur à l'excitation séparée



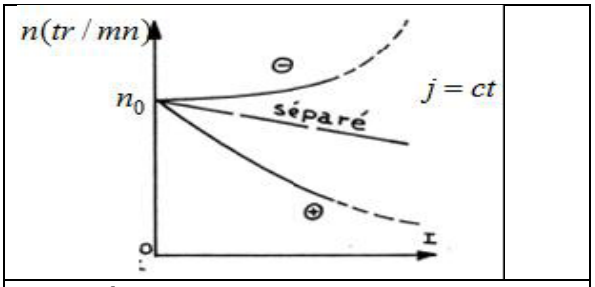
Caractéristique du couple

- *Caractéristique de la vitesse*

La vitesse de rotation *n* est inversement proportionnelle au flux φ(j').

-Si le flux est additif, la vitesse diminue, elle est plus faible que celle d'un moteur séparé.

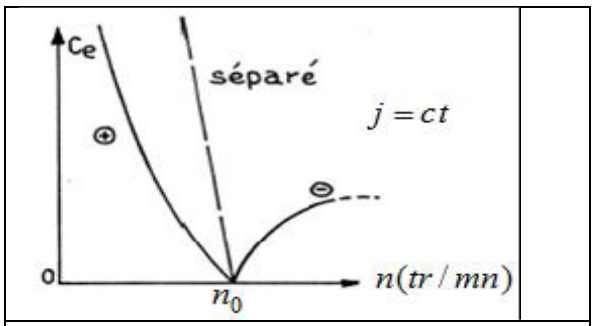
-Si le flux est soustractif, le flux φ(j') diminue lorsque I augmente. La vitesse de rotation augmente.



Caractéristique de la vitesse

- *Caractéristique mécanique*

Elle est obtenue en éliminant le courant I de deux courbes précédentes



Caractéristique mécanique

2.3. Comparaison entre moteur série et shunt

– Le moteur série supporte bien les surcharges que le moteur shunt. En effet, pour un même accroissement de couple, l'appel de courant qu'il provoque est moindre que dans un moteur shunt.

– Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation ; contrairement au moteur shunt (son excitation dépend de la tension d'alimentation). c'est un avantage en traction ou, en bout de ligne un moteur peut être alimenté à tension assez faible (à cause de la forte chute en ligne).Le moteur série permet de monter une cote, tandis que le moteur shunt absorbant un courant excessif peut ˆêtre détruisant

– L'emballement du moteur série à vide est un inconvénient sérieux qui limite son emploi.

– Le moteur série est surtout utilisé en traction électrique ou l'on apprécie sa robustesse (enroulement inducteur gros fil ne risque pas le rupture) et surtout son autorégulation de puissance qui lui permet de ralentir en cote et de monter sans échauffement exagéré. On l'emploi également dans les entrainements des appareils pour lesquels le couple résistant croit rapidement avec la vitesse (ventilateurs, compresseurs pompes centrifuges.

– Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse, il convient dans les entrainements des machines dont la vitesse doit rester sensiblement constante. On l'emploi également dans les entrainements des appareils de levage ou la charge peut être supprimée brusquement et ou avec moteur série, il y'a risque d'emballement.