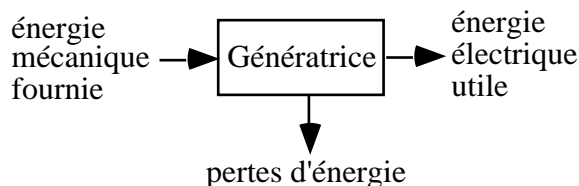
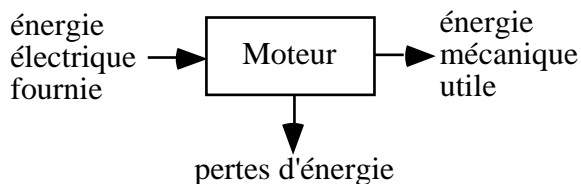


# Machine à courant continu

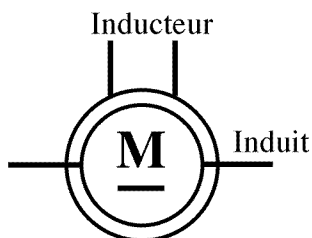
## 1 Présentation générale

Tous les résultats présentés dans cette première partie du cours sont valables que la machine fonctionne en moteur ou en génératrice.

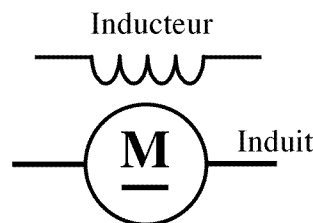
### 1.1 Conversion d'énergie



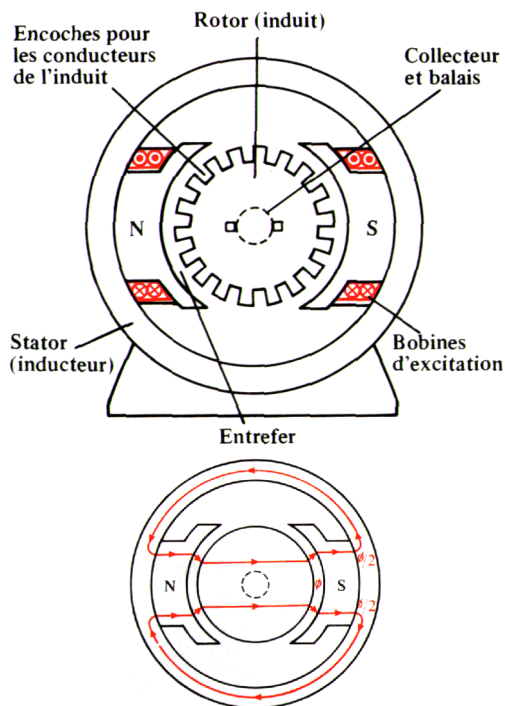
### 1.2 Symbole



ou



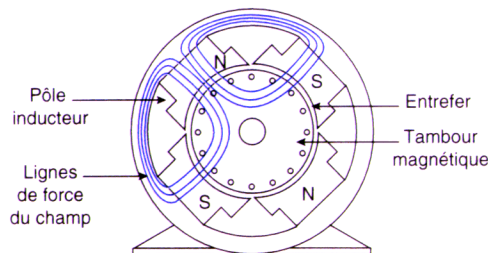
### 1.3 Constitution



Circuit magnétique d'un moteur bipolaire

Le moteur comprend :

- un **circuit magnétique** comportant une partie fixe, le stator, une partie tournant, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties.
- une source de champ magnétique nommée **l'inducteur** (le stator) crée par un bobinage ou des aimants permanents
- un circuit électrique **induit** (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques
- le **collecteur** et les **balais** permettent d'accéder au circuit électrique rotorique



Circuit magnétique d'un moteur tétrapolaire

### 1.4 Force électromotrice

Nous savons qu'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.é.m. E :

$$E = \frac{p}{2\pi a} N\Phi\Omega$$

avec:

- p le nombre de paires de pôles
- a le nombre de paires de voies d'enroulement
- N le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)
- $\Phi$  flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)
- $\Omega$  vitesse de rotation (en rad.s<sup>-1</sup>)

Finalement:

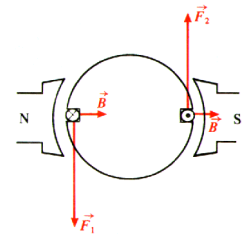
$$E = K\Phi\Omega \quad \text{avec } K = \frac{p}{2\pi a} N$$

Si de plus la machine fonctionne à flux constants

$$E = K'\Omega \quad \text{avec } K' = K\Phi$$

### 1.5 Couple électromagnétique

**Exemple pour une spire :** les deux brins d'une spire placés dans le champ magnétique  $\vec{B}$ , subissent des forces de Laplace  $\vec{F}_1$  et  $\vec{F}_2$  formant un couple de force ( $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I.\vec{l} \wedge \vec{B}$ ).



Pour une spire :  $\Gamma = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$

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

K est la même constante que dans la formule de la f.é.m.:  $E = K\Phi\Omega$

Si de plus la machine fonctionne à flux constant :  $T_{em} = K' I$  avec  $K' = K\Phi$

### 1.6 Puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I, il reçoit une puissance électromagnétique  $P_{em} = E.I$

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.

$$P_{em} = T_{em}\Omega = EI \quad P_{em} \text{ en watts}$$

**Remarque :** on retrouve la relation  $T_{em} = K\Phi I$

En effet  $E = K\Phi\Omega$  donc  $EI = K\Phi\Omega I = T_{em}\Omega$  d'où  $T_{em} = K\Phi I$

### 1.7 Réversibilité

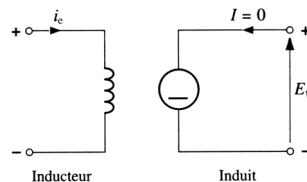
A flux  $\Phi$  constant, E ne dépend que de  $\Omega$  et I ne dépend que de  $T_{em}$ .

La f.é.m. de la machine et l'intensité du courant dans l'induit sont deux grandeurs indépendantes. On peut donc donner le signe souhaité au produit E.I.

La machine peut donc indifféremment fonctionner en moteur ( $P_{em} > 0$ ) ou en génératrice ( $P_{em} < 0$ ).

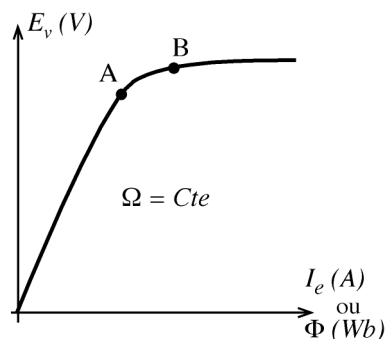
### 1.8 Caractéristiques

Conditions expérimentales :



#### 1.8.1 Caractéristique à vide $E_v = f(\Phi)$ à $\Omega$ constante

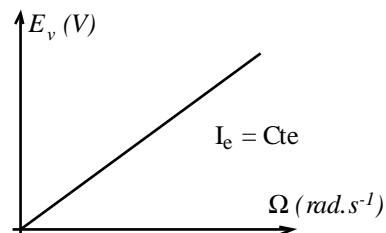
- De O à A, la caractéristique est linéaire,  $E = K' \Phi$  (avec  $K' = K \Omega$ ).
  - De A à B le matériau ferromagnétique dont est constitué le moteur commence à saturer. ( $\mu_R$  n'est plus constant).
  - Après B, le matériau est saturé, le f.é.m. n'augmente plus.
  - La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage du point A.
- Sous le point A, la machine est sous utilisée, et après le point B les possibilités de la machine n'augmentent plus (mais les pertes augmentent puisque  $I_e$  augmente)
- Dans la réalité, du fait du matériau ferromagnétique, on relève une caractéristique avec une faible hystérésis.



#### 1.8.2 Caractéristique $E_v = f(\Omega)$ à $\Phi$ constant

$$E = K' \Omega$$

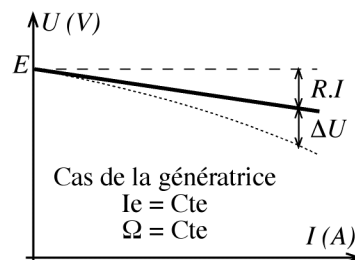
**Remarque :** la caractéristique est linéaire tant que la saturation n'est pas atteinte.



#### 1.8.3 Caractéristique en charge $U = f(I)$

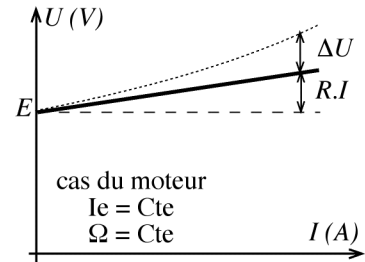
- La résistance du bobinage provoque une légère **chute de tension ohmique** dans l'induit :  $R.I$
- Le courant qui circule dans l'induit crée un flux indésirable de sorte que le flux total en charge  $\Phi_{Charge}(I_e, I) < \Phi_{Vide}(I_e)$ . Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire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

Pour l'annuler, 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.



Pour une génératrice  $U = E - RI - \Delta U$   
 Pour un moteur  $E = U - RI - \Delta U$

• La distribution du courant d'induit par les balais et le collecteur provoque également une légère chute de tension (souvent négligée).



### 1.8.4 Modèle équivalent de l'induit

Des caractéristiques précédentes on déduit un schéma équivalent de l'induit :

- E : f.é.m.
- R : résistance du bobinage
- I : courant d'induit
- U : tension aux bornes de connexion de l'induit.

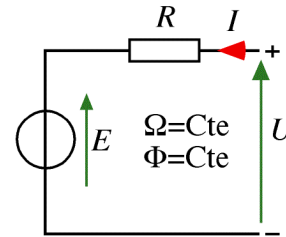


Schéma en convention récepteur

D'après la loi d'Ohms :  $U = E + RI$

### 1.8.5 Les différentes pertes

Pertes	<u>Pertes magnétiques</u> $P_{fer}$ ou pertes ferromagnétiques ou pertes fer	<u>Pertes joules</u> $P_J$	<u>Pertes mécaniques</u> $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et au courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de $\Omega$ .	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistance des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
Parades	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

On définit :

**Pertes constantes**

$$P_C = P_{fer} + P_{méca}$$

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.

**Remarque**

Toute relation entre des puissances peut être ramenée à une relation entre des couples. Il suffit de diviser cette première par la vitesse de rotation  $\Omega$  (en  $\text{rad.s}^{-1}$ )

**Couple de pertes  $T_p$**

$$T_p = \frac{P_C}{\Omega}$$

$P_C$  est proportionnel à  $\Omega$ , donc  $P_C = k\Omega$

$$\text{Donc : } T_p = \frac{P_C}{\Omega} = \frac{k\Omega}{\Omega} = k$$

le moment du couple de pertes est une caractéristique constante du moteur quelle que soit la vitesse.

### 1.8.6 Rendement

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

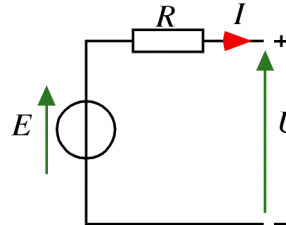
## 2 Génératrice

Caractéristiques :  $E = K\Phi\Omega$

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

$$U = E - RI$$

Modèle équivalent de l'induit :



Remarquer la convention générateur du courant.

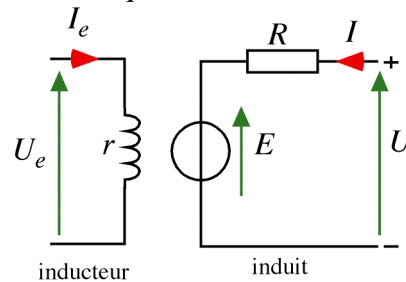
## 3 Moteur à excitation indépendante

### 3.1 Modèle équivalent

Caractéristiques :

$E = K\Phi\Omega$
$T_{em} = K\Phi I$
$U = E + RI$

Modèle équivalent :



L'induit est en convention récepteur

Il faut deux alimentations : une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit.

Les quatre grandeurs qui déterminent le fonctionnement du moteur sont :  $U, I$  et  $\Phi$ .

### 3.2 Vitesse de rotation

Le sens de rotation dépend :

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation  $I_e$  ;
- du sens du courant d'induit  $I$ .

Expression de la vitesse :  $E = K\Phi\Omega = U - RI$

$\Rightarrow$

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\Phi}$$

### 3.3 Démarrage du moteur

#### 3.3.1 Surintensité de démarrage (exemple)

Soient :

$T_{dc}$  le couple de démarrage imposé par la charge (N.m);

$T_d$  le couple de démarrage du moteur (N.m);

$I_d$  le courant de démarrage (A);

$U_n = 240 \text{ V}$  la tension d'alimentation nominale de l'induit ;  
 $I_n = 20 \text{ A}$  le courant nominal dans l'induit ;  
 $R = 1 \ \Omega$  la résistance de l'induit.

**Au démarrage :**  $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$  et donc  $I_d = \frac{U_n - E}{R} = \frac{U_n}{R} = 240 \text{ A} \gg I_n$

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.*

### 3.3.2 Conséquences

La pointe de courant de 240 A va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet joule.

*Il faut limiter le courant de démarrage : en générale on accepte  $I_d = 1,5 I_n$*

### 3.3.3 Solutions pour limiter le courant

**Solution 1 :** on utilise des rhéostats de démarrage. Cette solution est peu économique.

Dans notre exemple  $U_n = (R + R_h)I_d = (R + R_h)1,5I_n$

Soit :  $R_h = \frac{U_n}{1,5I_n} - R = 7 \ \Omega$

**Solution 2 :** on démarre sous une tension d'alimentation réduite.

Dans notre exemple  $U_d = RI_d = R \cdot 1,5 \cdot I_n = 30 \text{ V}$

### 3.4 Fonctionnement à vide

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

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

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

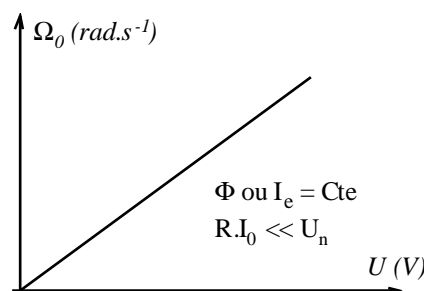
**Attention :** à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation  $I_e$  lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. En effet si  $I_e \rightarrow 0$  alors  $\Phi \rightarrow 0$  et  $\Omega_0 \rightarrow \infty$ .

Si  $\Phi$  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  $K_2 = \frac{1}{K\Phi}$

La caractéristique passe approximativement par zéro.



### 3.5 Fonctionnement en charge

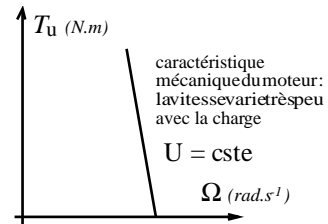
Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

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

La vitesse dépend de :

- la tension d'alimentation  $U$  ;
- l'intensité du courant  $I$  imposée par le moment du couple résistant.

$U$  reste tout de même grand devant  $R.I$ . En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation  $U$  et varie très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.



Exprimons le courant en fonction du couple utile :  $I = \frac{T_{em}}{K\Phi} = \frac{T_u - T_p}{K\Phi}$

Le couple de perte  $T_p$  reste constant et faible devant le couple de charge  $T_r$ .

#### 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 :

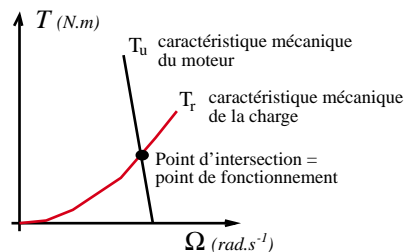
- La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation  $\Omega \approx \frac{U}{K\Phi}$ .
- La charge impose la valeur du courant  $I \approx \frac{T_r}{K\Phi}$ .

### 3.6 Point de fonctionnement

Une 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.

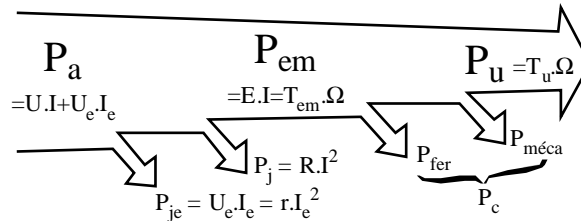


### 3.7 Bilan énergétique

Soient :

- $P_a$  la puissance absorbée (W) ;
- $U_e$  la tension de l'inducteur (V) ;
- $I_e$  le courant d'inducteur (A) ;

$P_{em}$	la puissance électromagnétique (W) ;	$E$	la f.é.m. (V) ;
$P_u$	la puissance utile (W) ;	$I$	le courant d'induit (A) ;
$P_{je}$	les pertes joules à l'inducteur (W) ;	$T_{em}$	le couple électromagnétique (N.m) ;
$P_j$	les pertes joules à l'induit (W) ;	$T_u$	le couple utile (N.m) ;
$P_{fer}$	les pertes ferromagnétiques (W) ;	$\Omega$	la vitesse de rotation (rad.s <sup>-1</sup> ) ;
$P_{méca}$	les pertes mécaniques (W) ;	$R$	la résistance d'induit ( $\Omega$ ) ;
		$r$	la résistance d'inducteur ( $\Omega$ ).



**Exploitation du diagramme :**

par exemple :  $P_{em} = P_a - P_{je} - P_j$  ;  $P_C = P_{em} - P_u$

**Remarques :**

- Toute l'énergie absorbée à l'inducteur et dissipée par effet joule. On peut omettre l'inducteur dans le bilan des puissances et alors  $P_{je}$  n'apparaît pas et  $P_a = U.I$ .
- Les pertes fer et les pertes mécaniques sont rarement dissociées, la somme étant les pertes constantes  $P_c$ .
- Si le moteur est à aimants permanents,  $U_e$ ,  $I_e$  et  $P_{je}$  n'existent pas.

**3.8 Couples**

**Soient :**

$T_{em}$  le couple électromagnétique (N.m) ;  
 $T_u$  le couple utile en sortie d'arbre (N.m).

**Pertes constantes**

$$P_C = P_{em} - P_U$$

D'après le diagramme des puissances,  $P_c$  est la différence entre la puissance électromagnétique et la puissance utile.

En effet :  $P_C = P_{fer} + P_{méca} = P_{em} - P_U$

**Couple de pertes  $T_p$**

$$T_p = \frac{P_C}{\Omega} = T_{em} - T_U$$

$$T_p = \frac{P_C}{\Omega} = \frac{P_{em} - P_U}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_U}{\Omega} = T_{em} - T_U$$

**3.9 Rendement**

**3.9.1 Mesure directe**

Cette méthode consiste à mesurer  $P_a$  et  $P_u$ .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega}{U \cdot I + P_{je}}$$



### 3.9.2 Méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes (voir TP).

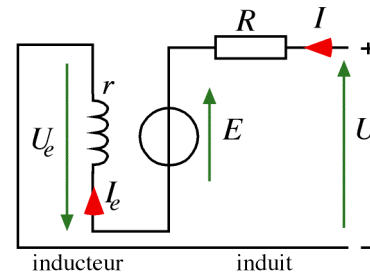
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a}$$

## 4 Moteur à excitation série

### 4.1 Principe

L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

Conséquence :  $I = I_e$   
 et comme  $\Phi = C_{ste} \cdot I_e$  (hors saturation)  
 $E = K\Phi\Omega = k\Omega I$   
 et  $T_{em} = K\Phi I = kI^2$



### 4.2 Modèle équivalent et caractéristiques

Caractéristiques :

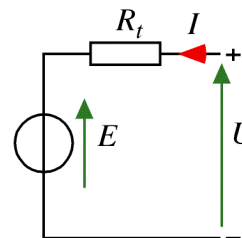
$$U = E + R_t I$$

$$E = k\Omega I$$

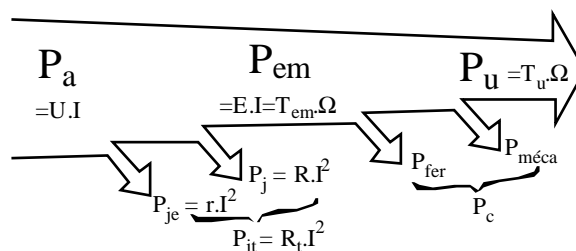
$$T_{em} = kI^2$$

$$\Omega = \frac{U - R_t I}{kI}$$

Schéma équivalent :  $R_t = r + R$



### 4.3 Bilan énergétique



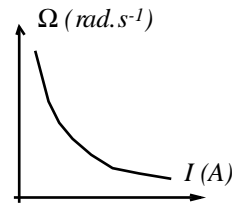
### 4.4 Fonctionnement

#### 4.4.1 Fonctionnement à vide

La charge impose le courant :  $I = \sqrt{\frac{T_{em}}{k}}$

Si  $T_{em}$  tend vers 0,  $I$  tend aussi vers 0 et  $\Omega$  tend vers l'infini (si l'on ne tient pas compte des frottements).

*Alimenté sous tension nominale, le moteur série ne doit jamais fonctionner à vide au risque de s'emballer.*



#### 4.4.2 Démarrage

##### Tension de démarrage :

Comme pour le moteur à excitation indépendante, il est préférable de démarrer sous tension d'induit réduite.

En effet au démarrage :  $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \Rightarrow I = \frac{U}{R_t}$

##### Couple de démarrage :

Le moteur série peut démarrer en charge.

Supposons que l'on limite le courant de démarrage  $I_d$  à 1,5 fois le courant nominal  $I_n$ .

Excitation indépendante :  $T_d = K\Phi I_d = 1,5K\Phi I_n = 1,5T_n$

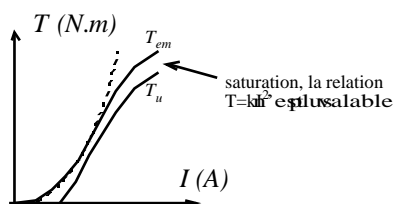
Excitation série :  $T_d = kI_d^2 = k(1,5I_n)^2 = 2,25kI_n^2 = 2,25T_n$

Pour les mêmes conditions, le moteur série possède un meilleur couple de démarrage que le moteur à excitation indépendante.

#### 4.4.3 Caractéristique $T=f(I)$

$$T_{em} = kI^2$$

$$T_u = T_{em} - T_p$$



#### 4.4.4 Caractéristique mécanique $T=f(\Omega)$

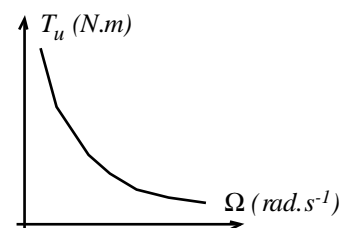
##### Fonctionnement sous tension nominale

Si nous négligeons les différentes pertes :

$$E = U \quad ; \quad I = \frac{U}{k\Omega} \quad \text{et} \quad T_u = kI^2 = \frac{U^2}{k\Omega^2}$$

Finalement :

$$T_u \Omega^2 = C^{te}$$



*Sous tension nominale, le moteur à excitation en série ne peut pas fonctionner à faible charge car la vitesse*

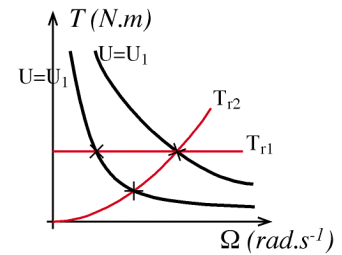
dépasserait largement la limite admise.

**Fonctionnement sous tension variable**

La diminution de la tension d'alimentation permet d'obtenir un déplacement de la caractéristique mécanique.

$T_{r1}$  et  $T_{r2}$  sont les caractéristiques de deux charges différentes.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des deux caractéristiques  $T_u$  et  $T_r$ .



**4.5 Sens de rotation**

**Rappel :** pour changer le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il faut inverser soit  $I$ , soit  $E$ .

Comme pour le moteur à excitation série  $I=E$ , pour changer son sens de rotation il faut inverser la connexion entre l'inducteur et l'induit.



**4.6 Moteur universel**

On constate donc que le courant dans un moteur à excitation série peut-être inversé sans que le sens de rotation le soit.

Le moteur peut donc fonctionner en courant alternatif.

Pour optimiser son fonctionnement en courant alternatif il subit quelques modifications.

On l'appelle le **moteur universel**.

**5 Emploi et identification**

**5.1 Moteur à excitation indépendante**

Ce moteur est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge.

En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur un large domaine.

Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage).

En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.

**5.2 Moteur à excitation en série**

Ce moteur possède un fort couple de démarrage. Il convient très bien dans le domaine des fortes puissances (1 à 10 MW) pour obtenir un fonctionnement satisfaisant en faible vitesse (traction, laminoirs).

En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion.

### 5.3 Remarque

De part ses difficultés de réalisation et son coût d'entretien le moteur à courant continu tend à disparaître dans le domaine des fortes puissances pour être remplacé par le moteur synchrone auto-piloté (ou moteur auto-synchrone).

### 5.4 Identification

**Exemple :**

LSK 1604 indique la série LSK ; 160 de hauteur d'axe ; 4 pôles.

IEC 34.1.1990		<b>LEROY SOMER</b>		MADE IN FRANCE	
M		M		M	
<b>MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR</b>					
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992   M 249 kg	
Classe / Ins class H		IM 1001		IP 23 IC 06	
M <sub>nom</sub> / Rated torque 301 N.m		Altit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	<b>kW</b>	<b>min<sup>-1</sup></b>	<b>V</b>	<b>A</b>	<b>V</b> <b>A</b>
Norm./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360 3
	3,63	115	44	9,55	360 3
	36,3	1720	440	95,5	240
T système peinture: I		<b>Induit / Arm.</b>		<b>Excit. / Field</b>	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3 ○	

## 6 Vocabulaire

Inducteur	Flux maximum	Feuilletage du circuit
Excitation	Couple électromagnétique	magnétique
Induit	Puissance électromagnétique	Rendement
Rotor	Réversibilité	Surintensité de démarrage
Stator	Puissance électromagnétique	Bilan énergétique
Circuit magnétique	Réaction magnétique d'induit	Couple moteur
Collecteur	Machine compensée	Moteur série
Balais	Pertes magnétiques	Point de fonctionnement
Force électromotrice (f.é.m.)	Pertes fer	Moteur universel
Nombre de paires de pôles	Pertes joule	
Nombre de voies d'enroulement	Modèle équivalent	

## 7 Extraits

- Physique Appliquée, terminale électrotechnique - collection R. Mérat et R. Moreau - édition Nathan technique 1994.
- Electrosystème, première STI - H. Ney - édition Nathan technique 1996.
- Physique appliquée, terminale génie électrotechnique - Delva, Leclercq, Trannoy - édition Hachette éducation 1994.