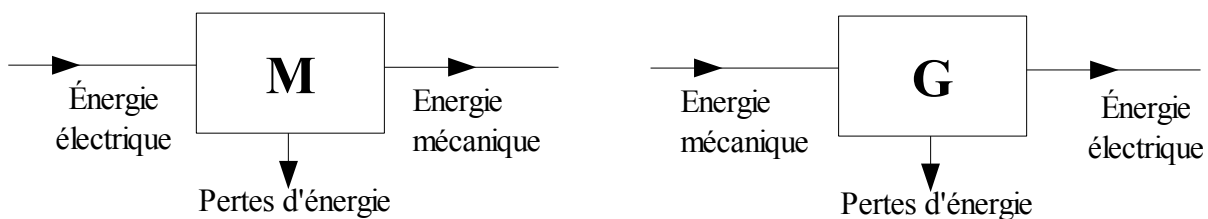


## MACHINE A COURANT CONTINU

### I. PRESENTATION

Une machine à courant continu est un convertisseur réversible rotatif d'énergie. Lorsque l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique, la machine fonctionne en moteur. Lorsque l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique, la machine fonctionne en générateur.

L'énergie mécanique se présente sous la forme d'un couple de moment  $T_u$  tournant à la vitesse  $\Omega$ .



### 1. SYMBOLE



### 2. CONSTITUTION

Une machine à courant continu est formée d'un circuit magnétique, d'un ou deux circuits magnétiques et d'un collecteur.

#### 2.1. CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Le circuit magnétique est formé d'une partie fixe, le **stator ou inducteur**, solidaire du bâti et de la carcasse, et d'un cylindre concentrique, le **rotor ou l'induit** mobile autour d'un arbre. Le rotor est séparé du stator par l'entrefer.

#### 2.2. DEUX CIRCUITS ÉLECTRIQUES

##### a. Circuit inducteur.

C'est généralement le stator qui est la source de champ magnétique. Celui-ci peut être créé, soit par un bobinage, soit par des aimants permanents.

Avec des aimants permanents, le champ magnétique est présent à tout instant. Avec un bobinage, il est nécessaire d'alimenter le circuit avec une alimentation en courant continu. Le circuit électrique correspondant est appelé circuit de l'inducteur.

### ***b. Circuit induit***

L'enroulement du rotor, plus complexe, est formé de conducteurs (10) logés dans des encoches (11) autour de l'induit.

### **2.3. COLLECTEUR ET BALAIS**

Le collecteur est constitué de lames de cuivre isolées les unes des autres. Sur ce collecteur frottent des balais en carbone. De ces balais partent les fils qui assurent la liaison électrique entre le rotoret l'extérieur de la machine.

---

## **II. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT**

---

### **1. FORCE ÉLECTROMOTRICE**

---

#### ***1.1. CAS D'UNE MACHINE FICTIVE À UNE SPIRE.***

La position de la spire est repérée par l'angle  $\theta$  entre la normale  $n$  au plan de la spire et l'axe NS de l'inducteur.

En admettant que le flux embrassé par la spire est une fonction sinusoïdale de  $\theta$ .

Les deux lames de collecteur font que:

- ✓ lorsque  $\theta$  est comprise entre 0 et  $\pi$ , la f.e.m.  $e$  de la machine est le f.é.m.  $e_s$  de la spire,
- ✓ lorsque  $\theta$  est comprise entre  $\pi$  et  $2\pi$  (les conducteurs traversent le ligne neutre, les lames du collecteur auxquelles sont reliées les conducteurs changent donc de polarité, mais aussi de balais), la f.é.m.  $e$  de la machine est l'opposé de le f.é.m.  $e_s$  de la spire.

Quelque soit la valeur de  $\theta$ , nous avons  $e = |e_s|$ . L'ensemble balais-collecteur se comporte comme un redresseur « mécanique ».

La valeur moyenne de la fonction  $|\sin(x)|$  étant égale à  $\frac{2}{\pi}$ , la valeur moyenne  $E$  de le f.é.m.

$$e = \Phi \Omega |\sin(\Omega \cdot t)| \quad \text{est} \quad E = \frac{2}{\pi} \Phi \Omega$$

En posant  $k = \frac{2}{\pi}$ , on obtient  $E = k \Phi \Omega$

avec  $E$ : f.é.m. (V)     $k$ : constante     $\Phi$ : flux (Wb)     $\Omega$ : vitesse angulaire (rad.s<sup>-1</sup>)

#### ***1.2. CAS DE LA MACHINE RÉELLE***

L'induit de la machine réelle comporte un grand nombre d'encoches (et autant de lames au

collecteur) dans lesquelles  $N$  conducteurs sont répartis pour former  $\frac{N}{2}$  spires. (une spire est constituée de 2 conducteurs).

L'ensemble des spires liées les unes à la suite des autres en permettant d'aller d'un balai à l'autre constitue une voie d'enroulement.

Soit le flux  $\phi$ , de valeur maximale  $\phi$  et  $\Omega$  la vitesse angulaire de rotation de la machine, la f.é.m. instantanée  $e$  de la machine est formée d'une succession de petites calottes de sinusoides

d'amplitude maximale  $\hat{e}$  proche de :  $\frac{N \phi \Omega}{2 \pi}$

Lorsque le nombre de conducteurs par encoche et le nombre d'encoches sont importants, la valeur moyenne  $E$  de  $e$  est sensiblement égale à  $\hat{e}$  donc :

$$E = \frac{N \phi \Omega}{2 \pi} = K \phi \Omega \quad \text{avec } K = \frac{N}{2 \pi} \quad N: \text{ nombre de conducteurs}$$

A flux constant  $\phi = \text{constant}$   $E = K' \Omega$  avec  $K' = K \phi$

$n$ : vitesse de rotation en tr.min<sup>-1</sup>  $\Omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$  on en déduit  $E = kn$  avec  $k = K' \frac{\pi}{30}$

## 2. COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Deux conducteurs diamétralement opposés traversés par un courant d'intensité  $I$  et placés dans un champ magnétique  $\vec{B}$  sont soumis à un ensemble de deux forces de Laplace formant un couple.

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I \vec{l} \wedge \vec{B}$$

Pour une spire: moment du couple  $\Gamma = 2rF = 2rIlB = SBI = \phi I$

La somme de tous les moments de ces couples de force constitue le moment de couple électromagnétique  $T_{em}$  en N.m.

La puissance électromagnétique de la machine est  $P_{em} = EI$

$P_{em}$ : W  $E$ : V et  $I$ : A

Cette puissance électromagnétique est aussi la puissance développée par le couple électromagnétique  $T_{em}$  tournant à la vitesse angulaire  $\Omega$ .

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

or  $E = K \phi \Omega$  d'où  $T_{em} \Omega = K \phi \Omega . I \Rightarrow \quad \mathbf{T_{em} = K \phi . I}$

Le moment de couple électromagnétique est indépendant de la vitesse de rotation.

Le couple est résistant lorsque la machine fonctionne en génératrice et il est moteur lorsqu'elle fonctionne en moteur.

## 3. MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE

- ✓ si  $I > 0$  et  $T_{em} > 0$ : fonctionnement moteur  $\left\{ \begin{array}{l} E: f.c.é.m. \\ T_{em}: couple\ moteur \end{array} \right\}$
  - ✓ si  $I < 0$  et  $T_{em} < 0$ : fonctionnement génératrice  $\left\{ \begin{array}{l} E: f.é.m. \\ T_{em}: couple\ résistant \end{array} \right\}$
  - ✓ si  $I = 0$  et  $T_{em} = 0$ : fonctionnement ni moteur, ni génératrice
- Dans tous les cas:  $T_{em} = K\phi.I$  et  $E = K\phi\Omega$

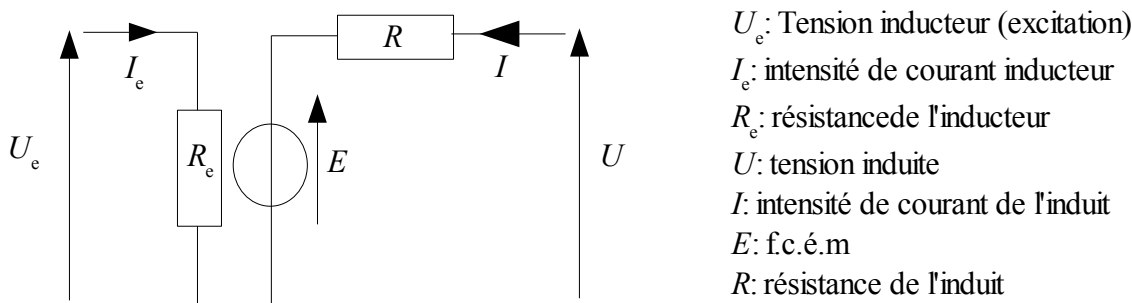
---

### III. MOTEUR A EXCITATION INDEPENDANTE

---

#### 1. SCHÉMA ÉQUIVALENT ET RELATIONS

---



Le circuit d'excitation (inducteur) de la machine est indépendant du circuit de l'induit.  
 L'induit est en convention récepteur.  
 Expérimentalement, il faut deux alimentations: une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit.  
 Les 4 grandeurs qui déterminent le fonctionnement du moteur sont:  $\Omega$ ,  $U$ ,  $I$  et  $\phi$ .

$$E = K\phi\Omega \quad \text{et} \quad T_{em} = K\phi I$$

En convention récepteur:  $\left\{ \begin{array}{l} U_e = R_e I_e \\ U = E + R.I \end{array} \right.$

#### 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 induit  $I$ .

On peut changer le sens de rotation en inversant l'un ou l'autre des courants  $I_e$  ou  $I$ .

Expression de la vitesse:  $E = K\phi\Omega = U - RI \rightarrow \Omega = \frac{U - RI}{K\phi}$

### 3. DÉMARRAGE DU MOTEUR

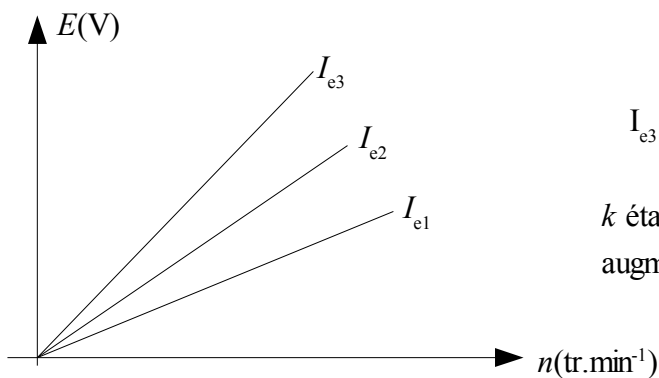
Il est important de respecter le mode opératoire suivant:

- ✓ mise en rotation: l'alimentation de l'induit étant à l'arrêt, on alimente l'inducteur jusqu'à l'obtention de l'intensité  $I_e$  indiquée sur la plaque signalétique. La tension de l'induit étant initialement à 0, on l'augmente progressivement jusqu'à l'obtention soit de la vitesse souhaitée pour le moteur, soit de la tension d'induit désirée.
- ✓ Arrêt du moteur: il faut diminuer d'abord la tension de l'induit jusqu'à l'arrêt du moteur avant de couper l'alimentation de l'inducteur.

Il y a emballement du moteur si l'on coupe l'excitation de la machine alors que l'induit est sous tension. Il faut bien retenir la règle suivante: ne jamais couper l'alimentation de l'inducteur du moteur à courant continu à excitation indépendante tant que l'induit est sous tension.

### 4. CARACTÉRISTIQUES

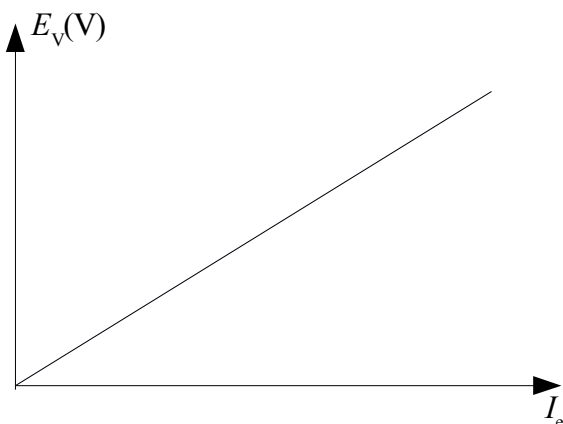
#### 4.1. Caractéristique $E(n)$ à $I_e = \text{constant}$ ( $\Phi = \text{constant}$ )



$I_{e3} > I_{e2} > I_{e1}$  : On en déduit  $E = kn$

$k$  étant proportionnel à  $\Phi(I_e)$ , lorsque  $I_e$  augmente (le flux augmente) et  $k$  (pente) croît.

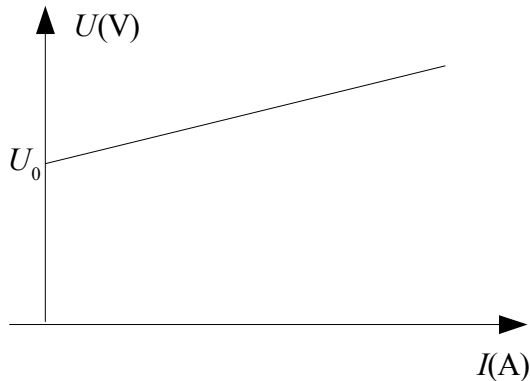
#### 4.2. Caractéristique $E(I_e)$ à $n = \text{constant}$



La limitation de la f.é.m.  $E$  pour les valeurs les plus élevées de l'intensité de courant d'excitation témoigne de la saturation du circuit magnétique de la machine: le flux sous un pôle n'est plus proportionnel à l'intensité du courant d'excitation.

On vérifie (sur la partie linéaire  $E = k \phi \Omega$ )

### 4.3. Caractéristique $U(I)$ de l'induit du moteur



$$U = E + R.I$$

D'après le graphe:

$U_0 = E$  : tension à vide du moteur ou f.é.m.

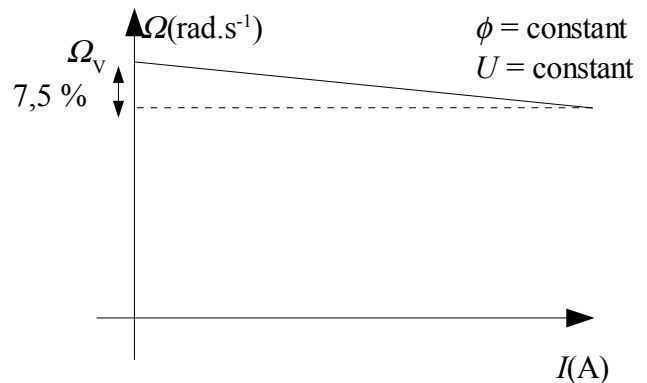
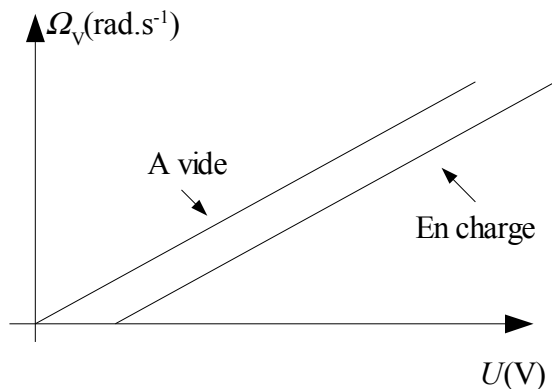
$$a: \text{pente } a = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = R : \text{résistance interne}$$

### 4.4. Fonctionnement en charge

$$E = K \phi \Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E}{K \phi} = \frac{U - R.I}{K \phi} = K_2 (U - R.I) \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K \phi} = \text{constant}$$

La vitesse dépend de :

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



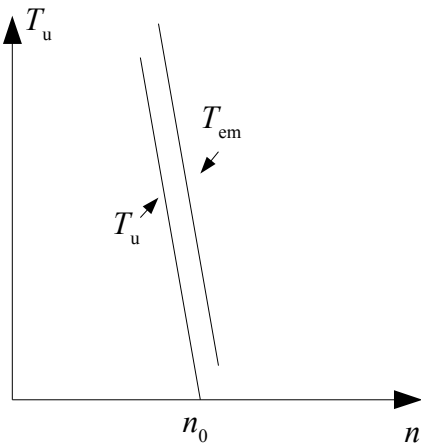
$$\text{à vide: } I = 0 \quad \Omega = \frac{U}{K \phi} = \Omega_v$$

$$\text{à } U = \text{constant} \quad \Omega = \frac{U}{K \phi} - \frac{R.I}{K \phi} = \Omega_v - \frac{R.I}{K \phi}$$

### 4.5. Caractéristique mécanique

On définit deux couples: le couple électromagnétique  $T_{em}$  et le couple moteur  $T_u$ . Ce dernier est le couple utile; c'est le couple disponible sur l'arbre moteur.

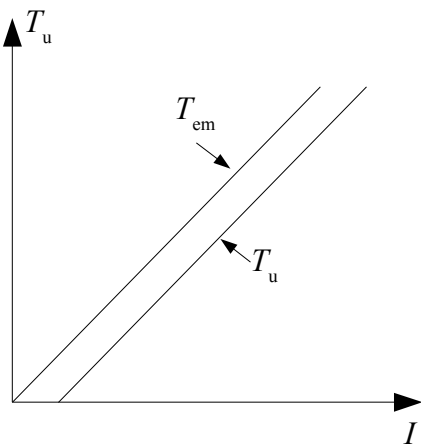
$$\text{Rappel: } T_{em} = K \phi . I = K' I \quad \text{avec } \phi = \text{constant} \quad K' = K \phi$$



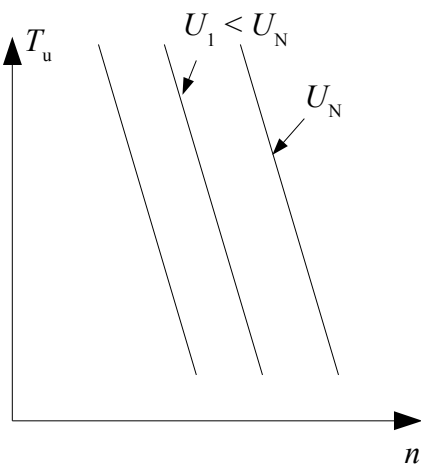
A cause des pertes magnétiques et mécaniques (dont on appelle la somme  $p_c$ ), la puissance utile  $P_u$  (sous forme mécanique) est inférieure à la puissance électromagnétique  $P_{em}$ .

$$P_{em} - P_u = p_c$$

Le moment du couple utile s'écrit :  $P_u = T_u \cdot \Omega$  or  $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega \Rightarrow p_c = T_p \cdot \Omega = T_{em} \cdot \Omega - T_u \cdot \Omega$   
 On en déduit:  $T_p = T_{em} - T_u$



$T_p = cst$   $T_u$  a pour expression  $a \cdot I + b$   
 or  $T_{em} = k \phi I$ , les droites sont parallèles, donc le coefficient directeur de la droite  $T_u$  est  $a = k \phi$   
 à  $I = 0$   $T_{em} = 0 \Rightarrow T_u = b = -T_p$   
 On en déduit  $T_u = k \phi I - T_p$



$T_u$  peut s'écrire sous la forme  $- a \cdot n + b$   
 $T_u = k \phi I - T_p$  or  $I = \frac{U - E}{R} = \frac{U - k' \cdot n}{R}$   
 $T_u = k \phi \left( \frac{U - k' \cdot n}{R} \right) - T_p = \frac{k \phi U}{R} - \frac{k \phi k' n}{R} - T_p$   
 à  $\phi = \text{constant}$  et  $U = \text{constant}$ :  
 le terme  $\frac{k \phi U}{R}$  est constant ainsi que  $T_p$ , on définit ainsi  $b = \frac{k \phi U}{R} - T_p$

et le coefficient directeur de la droite est  $a = \frac{k \cdot k' \cdot \phi}{R} = \text{constant}$  et est indépendant de  $U$ .

En modifiant la tension induite  $U$  (sans changer le flux  $\phi$  -c'est à dire le courant d'excitation), la caractéristique se déplace parallèlement à elle-même.

---

## 5. CONDITION DE DEMARRAGE

---

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:

$$T_u = T_r = k \phi I_d \quad \text{avec } I_d : \text{ intensité de démarrage.}$$

$$\Rightarrow I_d = \frac{T_r}{k \cdot \phi} : \text{ courant de décollage.}$$

La pointe de courant va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet Joule. On accepte généralement  $I_d = 1,5 I_n$

Pour limiter le courant au démarrage, on démarre sous tension réduite.

---

## IV. BILAN ENERGETIQUE

---

### 1. PUISSANCE RECUE

---

A aimant permanent, seul l'induit est alimenté:  $P_a = U \cdot I$

Avec une excitation indépendante, l'induit et l'inducteur sont alimentés par une tension continue:  $P_a = U_e \cdot I_e + U \cdot I$

### 2. PERTES

---

Pertes par effet Joule:

$$\text{dans l'inducteur (excitation): } P_{je} = U_e \cdot I_e = R_e \cdot I_e^2$$

$$\text{dans l'induit: } P_{ji} = R \cdot I^2$$

Pertes mécaniques  $P_{méc}$  et magnétiques  $P_{fer}$   $p_c = T_p \cdot \Omega = P_{méc} + P_{fer}$

### 3. PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE $P_{em}$

---

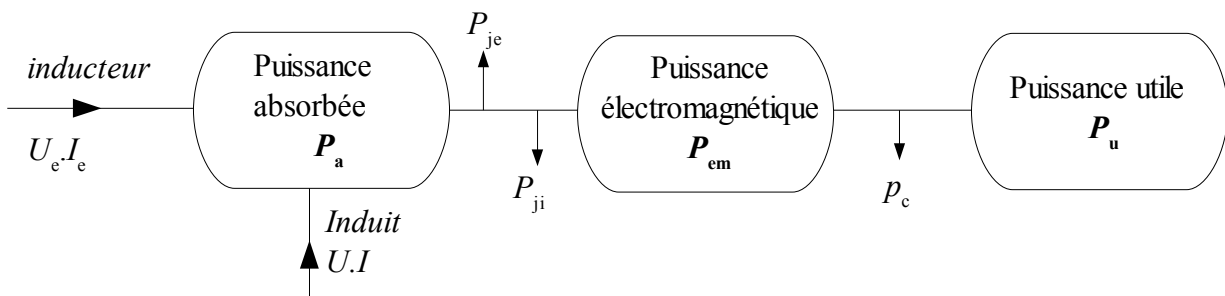
$$P_{em} = E \cdot I = T_{em} \cdot \Omega \left\{ \begin{array}{l} E : \text{ f.c.é.m. en } V \\ I : \text{ intensité de courant dans l'induit en } A \\ T_{em} : \text{ couple électromagnétique en } N.m \\ \Omega : \text{ vitesse de rotation en } rad.s^{-1} \end{array} \right.$$



#### 4. PUISSANCE UTILE $P_u$

$P_u$  sous forme mécanique en W  $P_u = T_u \Omega$

#### 5. BILAN



$$P_a = U_e \cdot I_e + U \cdot I$$

$$P_u = P_{em} - p_c \quad \text{avec} \quad p_c = P_{méc} + P_{fer}$$

$$P_u = P_a - \Sigma \text{ Pertes} = P_a - (p_c + P_{je} + P_{ji}) \quad \text{avec} \quad \Sigma = p_c + P_{je} + P_{ji}$$

$$P_{em} = P_a - P_{je} - P_{ji}$$

#### 6. RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{U_e \cdot I_e + U \cdot I} = \frac{T_u \Omega}{U_e \cdot I_e + U \cdot I} \quad \text{ou encore} \quad \eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \Sigma \text{ Pertes}}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \Sigma \text{ Pertes}}$$

---

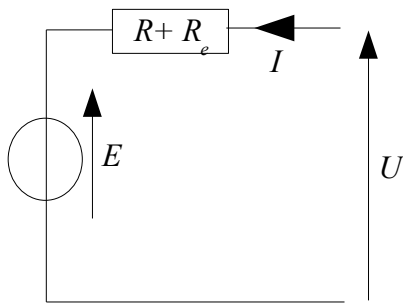
**MOTEUR à EXCITATION SERIE**


---

**1. SCHÉMA ÉQUIVALENT ET RELATIONS**


---

Le circuit d'excitation de la machine est en série avec le circuit de l'induit, ils sont traversés par le même courant.



Le moteur série présente des analogies avec le moteur à excitation indépendante: démarrage et freinage, détermination des pertes collectives et du point de fonctionnement.

Les différences sont dues à la production du flux  $\phi$  par le courant I. Le circuit magnétique n'est pas saturé.

Le flux augmentant proportionnellement au courant  $\phi = K'.I$ , les relations sont:

$$E = K.\phi.\Omega = K.K'.I.\Omega = k.I.\Omega \quad \text{avec } k = K.K'$$

$$T_{em} = K.\phi.I = K.K'.I^2 = k.I^2$$

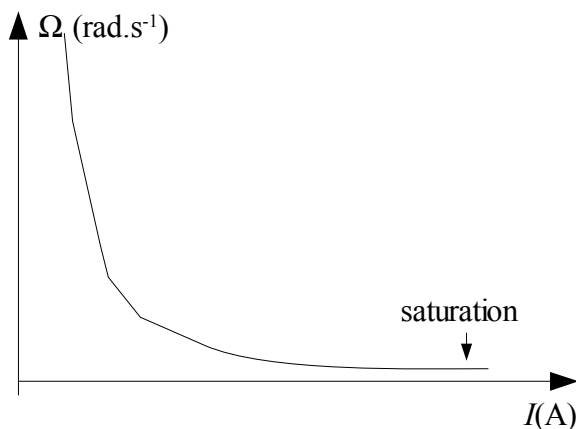
**2. FONCTIONNEMENT SOUS TENSION CONSTANTE**


---

Le même courant I circulant dans l'inducteur et dans l'induit, le sens de rotation est indépendant de celui du courant. Pour changer le sens de la rotation, il faudra inverser les connexions entre les deux circuits d'inducteur et d'induit.

$$\text{Expression de la vitesse: } \Omega = \frac{E}{K\phi} = \frac{U - R_T I}{K\phi} = \frac{U - R_T I}{kI}$$

La vitesse est une fonction homographique du courant (hyperbolique).



La courbe montre que la vitesse augmente lorsque I imposée par la charge diminue.

$$I \rightarrow 0 \text{ alors } \Omega \rightarrow \infty$$

**PROCEDURE DE MISE EN ROTATION ET D'ARRÊT DU MOTEUR:**

**Il y a emballement du moteur si on ne le charge pas.**

**Avant de démarrer le moteur, il faut s'assurer que le frein exerce un couple résistant. Ensuite, on augmente progressivement la tension  $U$  d'alimentation.**

**Pour arrêter le moteur série, il faut annuler la tension d'alimentation, en étant toujours en charge.**

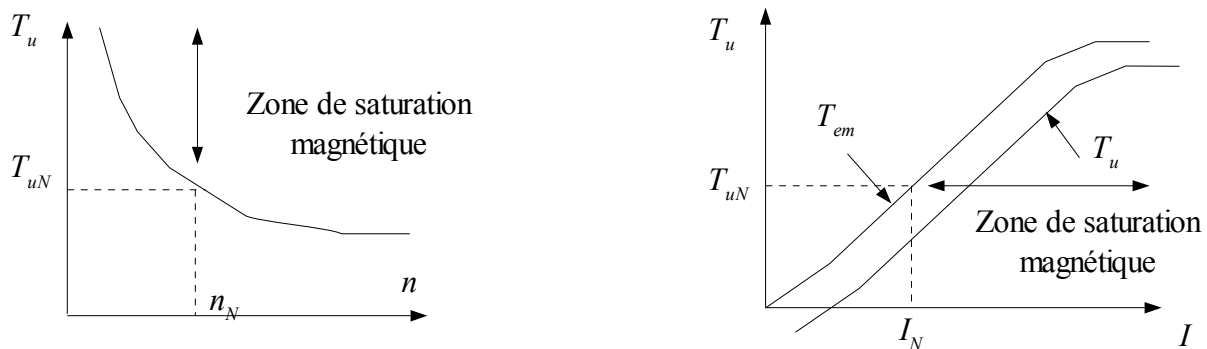
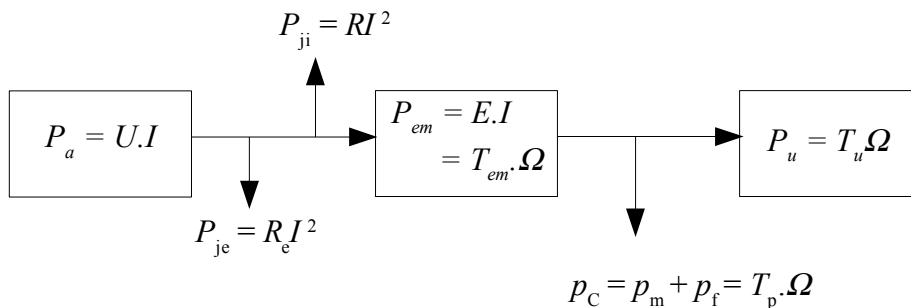
$$T_{em} = k I^2 \Rightarrow I = \sqrt{\frac{T_{em}}{k}}$$

Au démarrage, le courant de démarrage  $I_d$  ne doit pas dépasser  $1,5 I_N$ .

$$\text{Excitation série: } \hat{T}_d = k \cdot \hat{I}_d^2 = k (1,5 I_N)^2 = 2,25 T_N$$

$$\text{Excitation indépendante: } \hat{T}_d = k \cdot \phi I_d = k \phi 1,5 I_N = 1,5 T_N$$

Dans les mêmes conditions de courant, le moment du couple de démarrage d'un moteur série est supérieur à celui du moteur à excitation indépendante.

**3. CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE****4. BILAN ÉNERGÉTIQUE**

$$\text{Rendement: } \eta = \frac{P_U}{P_a} = \frac{P_u}{UI}$$