

Machine à courant continu

I. Introduction

La machine à courant continu est un "convertisseur électromécanique" encore très utilisé. Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, la machine à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique :

On la rencontre dans des applications très diverses, par exemple :

- Moteur de jouet (très faible puissance, alimentation par pile),
- Moteurs d'équipement automobile (démarrreur, essuie-glace, ventilateur...),
- Moteur d'entraînement à vitesse variable.

II. Les principes de la machine à courant continu

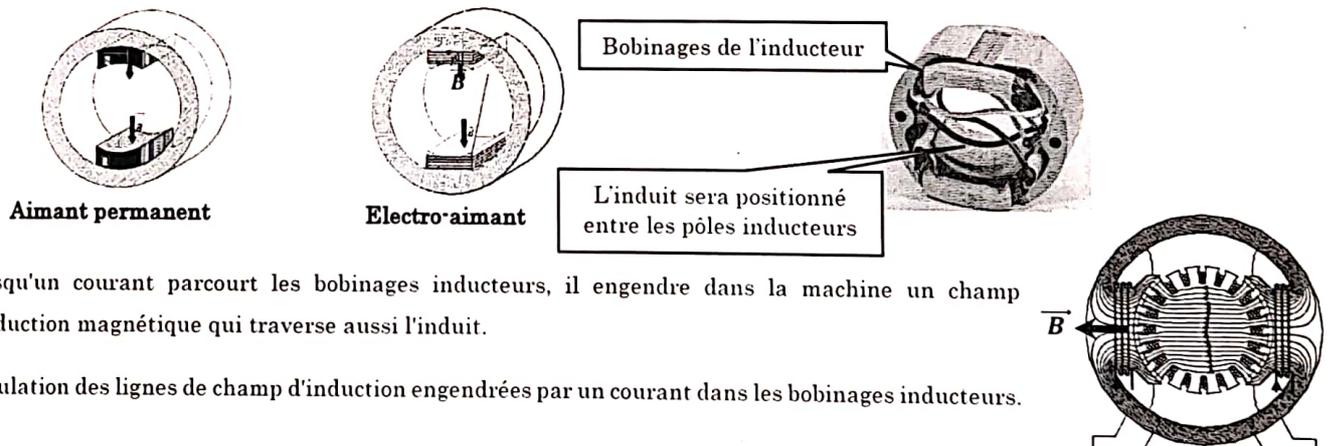
La machine à courant continu a pour rôle de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique (mouvement de rotation) ou, inversement de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans le premier cas, on dit qu'elle fonctionne en moteur ; et dans le second cas en génératrice : c'est une machine réversible.

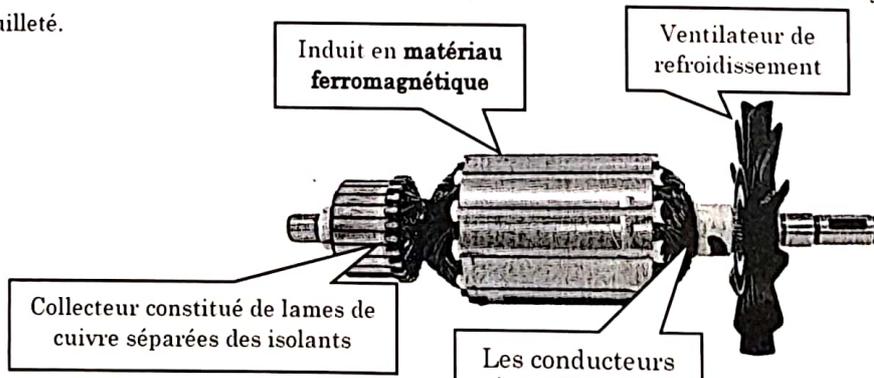
III. Constitutions de la machine à courant continu

La machine à courant continu est constituée de trois parties :

1. **Un stator** (partie fixe avec des aimants ou des électroaimants) qui possède un pôle Nord et un pôle Sud, et qui engendre donc un "champ" d'induction \vec{B} entre eux. (Pour cette raison, on l'appelle l'inducteur).



2. **Un rotor** (partie tournante) qui subit l'induction, (c'est pourquoi on l'appelle l'induit.). Les machines à courant continu adoptent un bobinage de l'induit plus compliqué bobiné dans les encoches d'un cylindre en matériau ferromagnétique feuilleté.



3. Un organe de liaison électrique entre l'induit et l'extérieur de la machine :

Les conducteurs de l'induit sont soudés à des lames conductrices sur lesquelles frottent des éléments conducteurs fixes appelés balais. L'ensemble des lames constitue le collecteur.



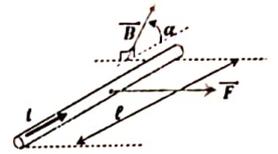
IV. Le principe de fonctionnement de la machine à courant continu

La machine à courant continu est basée sur la loi de Laplace :

Loi de Laplace :

Un conducteur de longueur l , placé dans un champ d'induction uniforme \vec{B} , et parcouru par un courant i est soumis à une force \vec{F} telle que :

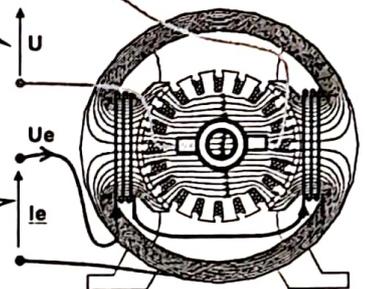
$$\vec{F} = i \cdot (\vec{l} \wedge \vec{B})$$



- o Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique \vec{B}
- o D'après la loi de Laplace, tous les conducteurs de l'induit sont soumis à une force \vec{F} .
- o Le sens du courant de l'induit I . Compte tenu de la disposition des conducteurs, la résultante de toutes les forces appliquées se traduit ainsi par un couple, qui fait tourner l'induit de la machine.

Alimentation... d'induit...

Alimentation... d'inducteur



V. Etude quantitative de la machine à courant continu

1. Force électromotrice induite

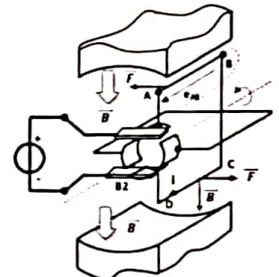
F.é.m. E entre les balais est la résultante des f.é.m. induites dans tous les conducteurs actifs (logé dans les encoches de l'induit) lors de leur déplacement dans le champ d'induction B . L'ensemble balais collecteur permet d'obtenir une f.é.m. E presque constante (Il reste une légère ondulation résiduelle).

Cette f.é.m. induite obéit à la loi : $E = K \phi \Omega$

Il en résulte que la f.é.m. E est proportionnelle à la vitesse de déplacement des conducteurs actifs et à la valeur de l'induction dans la machine.

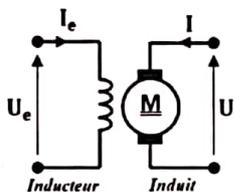
Lorsque le flux crée par l'inducteur est constant, la force électromotrice s'écrit : $E = k_e \Omega$

avec $k_e = K \phi$

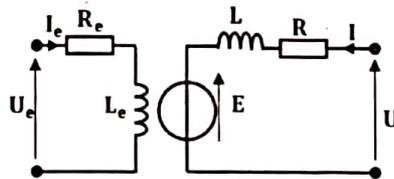


2. Modèle électrique de la machine à courant continu

L'induit étant un bobinage réalisé en cuivre, il possède une résistance R et une inductance L :

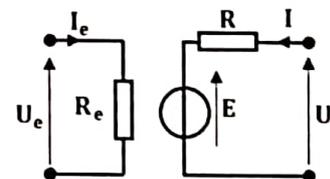


Symbole d'une MCC



régime... transitoire...

Les grandeurs sont variables, ce modèle est utilisé dans l'étude d'une MCC en régime



régime... permanent

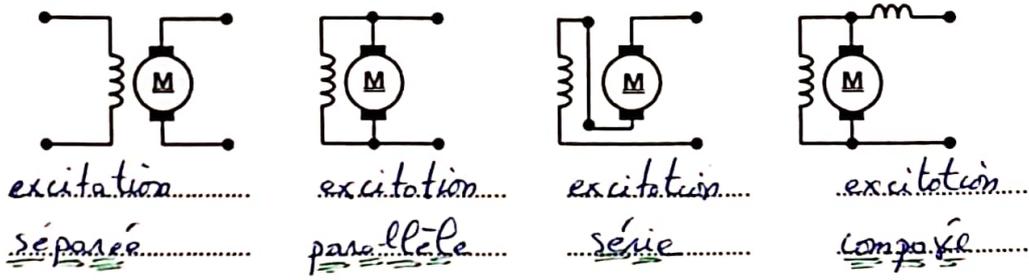
En régime établi le courant $I = Cte$ et $L \frac{di}{dt} = 0$

- U_e : la tension appliquée aux bornes de l'inducteur
- U : la tension appliquée aux bornes de l'induit
- i_e : le courant absorbé par l'inducteur
- I : le courant absorbé par l'induit
- E : la force électromotrice induite
- R_e : la résistance du bobinage de l'inducteur
- R : la résistance du bobinage de l'induit
- L : l'inductance du bobinage de l'induit
- L_e : l'inductance du bobinage de l'inducteur

Dans ce cours, on se limite au régime permanent de la machine à courant continu.

3. Modes d'excitation de la machine à courant continu

C'est la manière de coupler l'induit et l'inducteur de la machine à courant continu. Il existe quatre excitations suivantes :

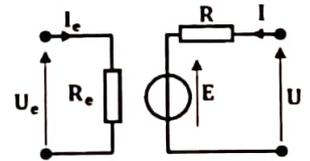


Dans ce cours, l'étude sera faite de la MCC avec l'excitation séparée (ou indépendante).

4. Moteur à courant continu en excitation séparée

La figure suivante montre le schéma équivalent de la machine à courant continu fonctionnant en moteur :

- o La tension absorbée par l'induit U : $U = E + R I$
- o La puissance absorbée par l'inducteur P_{ex} : $P_{ex} = U_e \cdot I_e = \frac{U_e^2}{R_e} = R_e I_e^2$
- o Les pertes joules induit P_{je} : $P_{je} = R I^2$
- o La puissance électromagnétique P_{em} transmise à l'induit : $P_{em} = E \cdot I$



5. Le couple électromagnétique

Dans l'induit se produit une transformation d'énergie de la forme électrique à la forme mécanique (fonctionnement en moteur) ou de la forme mécanique à la forme électrique (fonctionnement en génératrice).

La puissance mécanique échangée dans l'induit lorsqu'il est en rotation s'exprime par le produit du moment d'un couple par la vitesse angulaire Ω : $P_{em} = C_{em} \Omega$

D'après la loi de conservation de l'énergie, ces deux puissances sont égales. On les nomme "puissance électromagnétique" (ou puissance électromécanique) : $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I}{\Omega} = \frac{k \phi \Omega \cdot I}{\Omega} \Rightarrow C_{em} = k \phi I$

si le flux ϕ est constant : $C_{em} = k_c I$ avec $k_c = k \phi$

Conclusion : Le moment du couple appliqué sur l'induit est proportionnel au courant dans les conducteurs actifs et à la valeur de l'induction dans la machine (représenté de manière globale par le flux ϕ sous un pôle).

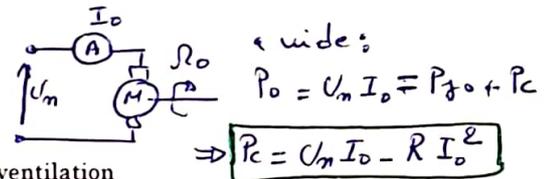
6. Le couple utile C_u

En réalité, le couple utile C_u (ou couple moteur C_m) dont on dispose sur l'arbre du moteur est très légèrement inférieur au couple électromagnétique C_{em} : $C_u = \frac{P_u}{\Omega}$, $C_u = k (I - I_0)$

7. Couple des pertes

C_p représente le couple des pertes est dû :

- o Aux pertes ferromagnétiques (hystérésis et courant de Foucault).
- o Aux pertes mécaniques : frottement aux contacts balais-collecteur, ventilation



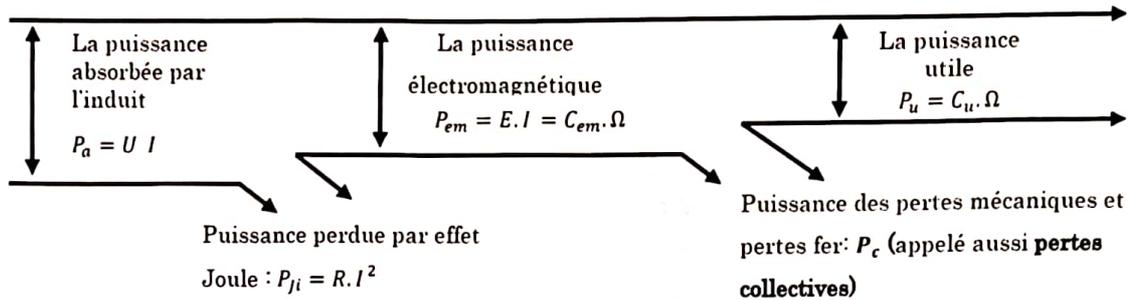
Le couple de pertes est estimé à l'essai à vide dont : $C_p = k \phi I_0$ Avec I_0 est le courant absorbé à vide (la machine n'entraîne pas aucune charge).

N.B : Pour un flux ϕ constant, le courant appelé par le moteur est proportionnel au couple mécanique demandé par la charge tel que : $C_p = k_c I_0$

8. Bilan des puissances d'induit

La machine à courant continu est un lieu d'échange d'énergie entre une forme électrique et une forme mécanique. Lors de cette transformation, une partie de cette énergie est perdue en raison des imperfections de la machine.

Donc :



Le rendement est défini par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{ji} + P_{fe} + P_c}$$

VI. Caractéristiques électromécaniques et mécanique

Nous allons évaluer l'allure des caractéristiques $\Omega(I)$, $C_{em}(I)$ et $C_u(\Omega)$ pour la machine à excitation par aimants ou à excitation séparée avec un courant inducteur constant (et donc un flux ϕ constant). $\rightarrow C_{em} = K_c.I$ et $E = K_e.\Omega$

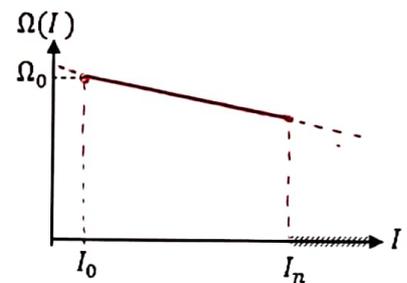
1. Caractéristique de la vitesse en fonction du courant appelé : $\Omega(I)$,

On a :
$$\begin{cases} U = E + R.I \\ E = K_e.\Omega \end{cases}$$

• a vide $\Rightarrow I \approx 0 \Rightarrow U = E \Rightarrow \Omega_0 = \frac{U}{K_e}$

• en charge $\Rightarrow I \approx I_m \Rightarrow E = K_e.\Omega = U - R.I$

$\Rightarrow \Omega = \frac{U}{K_e} - \frac{R.I}{K_e} \Rightarrow \Omega = \Omega_0 - \frac{R.I}{K_e}$



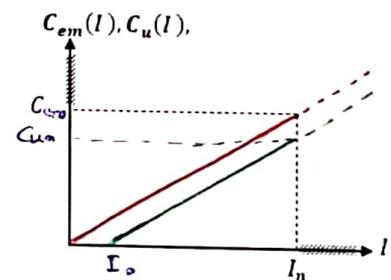
- Il ne faut pas dépasser le courant nominal à cause de la destruction du bobinage de l'induit.
- Il ne faut surtout pas couper le flux inducteur lorsque l'induit est alimenté car la machine peut s'emballer $\phi \rightarrow 0 \Rightarrow K_e \rightarrow 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$

2. Caractéristiques électromagnétiques : $C_{em}(I)$ et $C_u(I)$

On a vu dans les paragraphes précédents que :

• Le couple électromagnétique : $C_{em} = K_c.I$

• Le couple utile : $C_u = C_{em} - C_p \Rightarrow C_u = K_c.(I - I_0)$



Le courant d'appel I est devenu important lorsque la machine est entraînée une charge importante (le couple C_{em} important), alors un contrôle de courant d'appel I est indispensable pour protéger le bobinage de l'induit contre les surintensités (destruction de bobinage). Il faut toujours : $I \leq I_n$

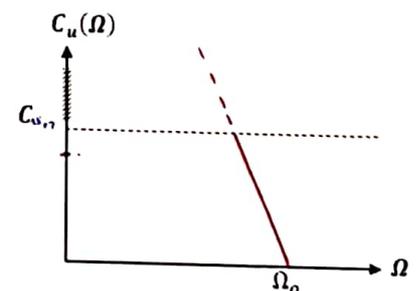
3. Caractéristique mécanique : $C_u(\Omega)$

C'est la principale caractéristique de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

On a $C_u = K_c.(I - I_0) \approx K_c.I$

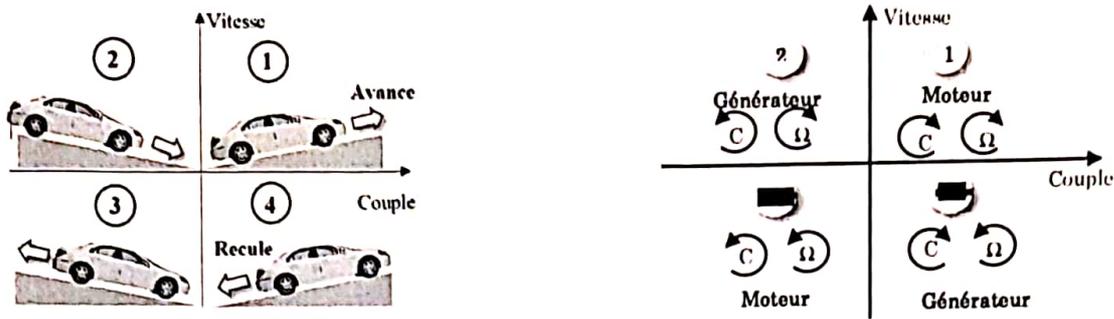
et on a $\Omega = \Omega_0 - \frac{R.I}{K_e} \Rightarrow I = \frac{K_e}{R} (\Omega_0 - \Omega)$

P.m.c.s. $C_u = \frac{K_c K_e}{R} (\Omega_0 - \Omega)$



VII. Les quatre quadrants de fonctionnement

En électronique de puissance, lorsqu'on associe un variateur de vitesse à une machine, il est nécessaire de préciser les quadrants de fonctionnement souhaités.

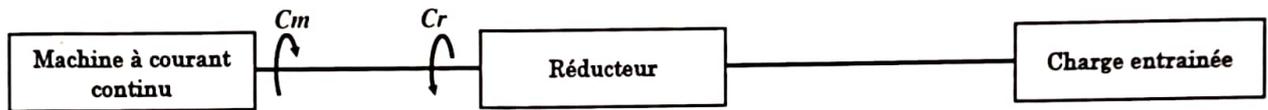


Exemple :

- o En levages la machine travaille dans les quadrants 1 (montée) et 4 (descente). (Le sens de rotation s'inverse mais pas le sens du couple)
- o Un tapis transporteur à un seul sens de déplacement travaille dans les quadrants 1 (moteur) et 2 (freinage) : ou seulement 1 (s'il n'y a pas de freinage électrique).

VIII. Point de fonctionnement à l'équilibre

Dans la pratique une machine électrique fonctionnant en moteur est destinée à entraîner une charge (machinerie) en rotation.



L'arbre du moteur exerce un **couple moteur Cm** destiné à entraîner la charge. La charge présente un **couple résistant Cr** qui généralement s'oppose au couple moteur.

1. Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)

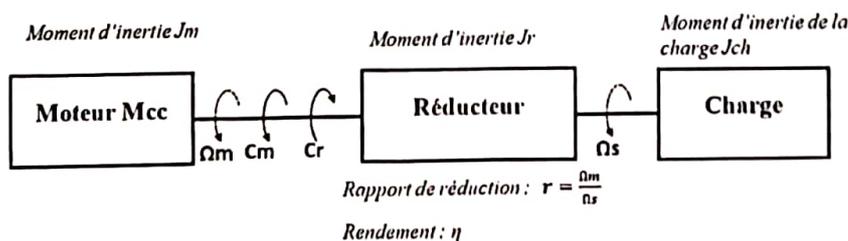
La loi fondamentale de la dynamique ($\sum \vec{F} = m \cdot \vec{\gamma}$) se ramène lors d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe à l'expression : **Somme des couple = $J \frac{d\Omega}{dt}$**
 La somme des couples est une somme algébrique.
 J désigne le moment d'inertie de l'ensemble tournant (moteur + charge) et Ω la vitesse angulaire

Si donc un moteur présente un couple moteur Cm, et que la charge oppose un couple résistant Cr, la relation précédente devient :

Cas 1 : sans réducteur

- o Le moment d'inertie totale : $J_T = J_m + J_c$
 - o Le couple visqueux : $C_p = f \cdot \Omega_m$
 - o L'équation dynamique : $J_T \frac{d\Omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \cdot \Omega_m(t)$
-

Cas 2 : avec réducteur



- Le moment d'inertie totale : $J_T = J_m + J_r + \frac{J_c}{r^2}$
- La relation entre les couples C_s et C_m : $\eta = \frac{P_r}{P_m} \Rightarrow C_s = \eta \cdot r \cdot C_m$
- L'équation dynamique : $J_T \frac{d\Omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f \Omega_m(t)$

2. Cycle de fonctionnement

Phase 1 : Démarrage

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta t} > 0 \Rightarrow \frac{d\Omega_m(t)}{dt} > 0 \Rightarrow C_m - C_r - f \Omega_m > 0$$

$$\Rightarrow C_m > C_r + f \Omega_m$$

Phase 2 : Permanent

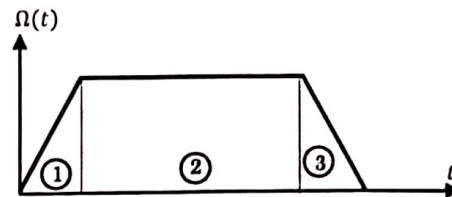
$$\frac{\Delta \Omega_m}{\Delta t} = 0 \Rightarrow \frac{d\Omega_m(t)}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow C_m = C_r + f \Omega_m$$

Phase 3 : Freinage

$$\frac{\Delta \Omega_m}{\Delta t} < 0 \Rightarrow \frac{d\Omega_m(t)}{dt} < 0$$

$$C_m < C_r + f \Omega_m$$



IX. Identification de la plaque signalétique

Il est indispensable de consulter la plaque signalétique de la machine. Elle porte en particulier les caractéristiques du régime nominal de la machine. Il correspond au couple que peut fournir la machine en permanence (service continu) sans échauffement excessif. Il est associé à une vitesse nominale N_n . Cette dernière n'est pas la vitesse maximale possible.

IEC 34.1.1990	LR 57008	2 102 451 / A	MADE IN FRANCE
MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR			
TYPE: LSK 1604 S 02	N° 700000/10	9/1992	M 249 kg
Classe / Ins class: H	IM 1001	IP 23	IC 06
$M_{nom} / \text{Rated torque}$: 301 N.m	Altitude: 1000 m	Temp: 40 °C	
Nom/Rat: 36.3 kW	1150 min ⁻¹	440 V	95.5 A
		360 V	3 A
T	Systeme peinture: I	Induct / Arm	Excit. / Field
Service / Duty: S1	DE 6312 2RS C3	NDE 6312 2RS C3	

$$P_{un} = 36,3 \text{ kW}, N_n = 1150 \text{ tr/min}, U_n = 440 \text{ V}, U_e = 360 \text{ V}, I = 95,5 \text{ A}$$

$$I_e = 3 \text{ A}$$

$$\Rightarrow P_{q_2} = U_n I_m + U_e I_e \Rightarrow P_{qm} = 43,1 \text{ kW} \Rightarrow \eta_n = \frac{P_{un}}{P_{qm}} \Rightarrow \eta_n = 84,2\%$$

X. Variation de la vitesse de la machine à courant continu

On posant $E = k \cdot \phi \cdot \Omega$ et $U = E + R \cdot I$, on démontre que : $\Omega = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \phi}$ (si U augmente, la vitesse augmente)

Le développement de l'électronique de puissance a permis la réalisation de sources de tension continue de valeur moyenne réglable (Hacheur : le chapitre suivant), permettant de commander les moteurs à courant continu dans une large gamme de vitesse.

