

Chapitre 5

Machines à courant continu

I. GENERATRICE A COURANT CONTINU

I.1. Présentation

La machine à courant continu comporte trois éléments essentiels :

- **L'inducteur** : C'est la partie fixe du moteur, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation. Il est constitué, soit par un aimant permanent, soit par un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation.
- **L'induit** : C'est la partie mobile, qui comporte une ou plusieurs bobines tournant dans le champ magnétique. Il est le siège d'une f.e.m induite alternative.
- **Le collecteur** : Il est également mobile, son rôle est de transformer le courant alternatif présent dans l'induit en courant unidirectionnel à l'aide de balais fixes.

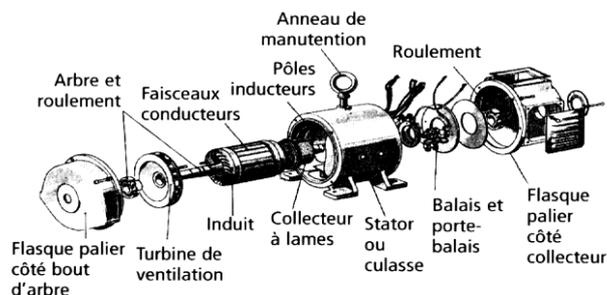


Figure 1

Le circuit électrique de l'inducteur est constitué de bobines branchées en série, il est alimenté en courant continu. Les bobines enroulées autour des noyaux polaires sont la source du champ magnétique. Suivant le nombre de bobines inductrices, on obtient :

- soit une machine bipolaire où l'on distingue l'axe des pôles et la droite perpendiculaire à l'axe des pôles qui est appelée ligne neutre,
- soit une machine multipolaire comportant $2p$ pôles (p pôles Nord et p pôles Sud).

Dans certaines machines de faible puissance, on utilise des aimants permanents à base de ferrites ou de terres rares, comme sources de champ magnétique, et donc comme inducteur.

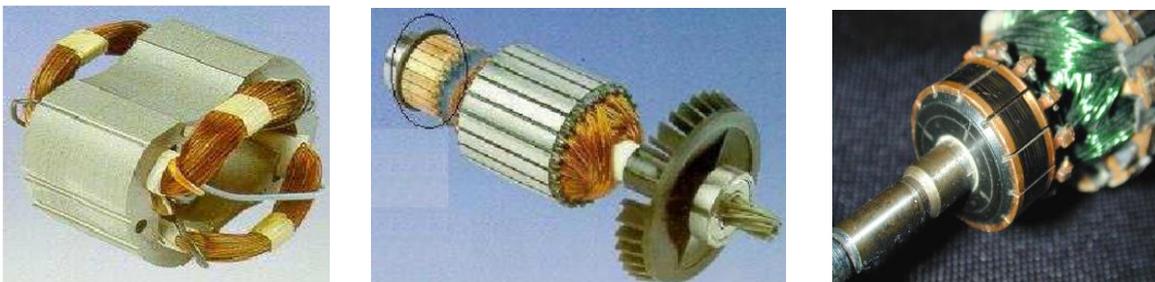


Figure 2

L'enroulement du rotor, plus complexe, est formé de conducteurs logés dans des encoches aménagées sur la surface extérieure de la carcasse cylindrique formant le circuit magnétique rotorique. Ce sont ces conducteurs solidaires du cylindre soumis aux forces de Laplace, qui vont entraîner celui-ci dans leur mouvement de rotation.

On relie ensemble deux conducteurs presque diamétralement opposés, pour constituer une spire dont les extrémités sont soudées à deux lames voisines d'un collecteur, solide de l'arbre.

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

Selon la nature de la conversion énergétique réalisée, deux types de machines sont distingués :

- la génératrice à courant continu, elle transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant continu.
- le moteur à courant continu, il transforme une énergie électrique de forme continue en une énergie mécanique.

La machine à courant continu possède la propriété de réversibilité, elle peut en effet fonctionner indifféremment en génératrice ou en moteur. C'est un convertisseur d'énergie réversible : la génératrice transforme l'énergie mécanique qu'elle reçoit en énergie électrique, alors que le moteur effectue la transformation inverse. Ces transformations s'accompagnent inévitablement de pertes.

- **Fonctionnement en mode génératrice :**

L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. L'induit est entraîné en rotation par un système d'entraînement. Il est le siège de variation de flux au travers de spires qui le constituent. Ils en résultent la création d'une f.e.m alternative qui est redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais.

- **Fonctionnement en mode moteur :**

L'inducteur est également alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. Par contre, l'induit est alimenté par une source de courant continu. Le champ inducteur agit sur ses conducteurs de l'induit en leur appliquant des forces électromagnétiques. Ces forces électromagnétiques produisent un couple moteur qui entraîne le rotor en rotation.

I.2. Modélisation de la génératrice à courant continu

- **Expression de la force électromotrice**

L'enroulement induit en mouvement dans le champ magnétique produit par l'inducteur est le siège d'une force électromotrice (f.e.m.) E à ses bornes.

Cette f.e.m est proportionnelle au nombre de conducteurs actifs de l'induit, à la vitesse de rotation n de l'induit, au flux Φ dans l'entrefer. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{2p}{2a} Nn\phi$$

E : f.e.m en Volts, n : vitesse de rotation de l'induit en tr/s, ϕ : flux magnétique maximum traversant les enroulements de l'induit en webers, N : nombre de conducteurs actifs de l'induit, $2p$: Nombre de voie d'enroulement, $2a$: Nombre de voie d'enroulement (on adopte : $2p/2a=1$).

- **Tension aux bornes de la génératrice**

En appliquant à l'induit la convention d'un générateur, la tension qu'il délivre à ses bornes s'exprime sous la forme :

$$U = E - R_a I_a$$

U et E : tension et f.e.m en Volts,

R_a : résistance de l'induit en Ohms,

I_a : courant d'induit en ampères.

La convention récepteur appliquée à l'inducteur donne :

$$U_{ex} = R_{ex} I_{ex}$$

U_{ex} : tension en Volts, R_{ex} : résistance de l'inducteur en Ohms et I_{ex} : courant d'inducteur en ampères.

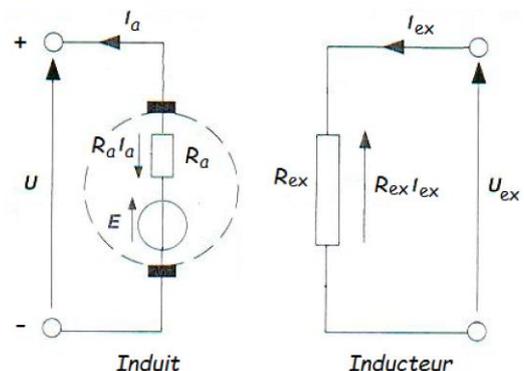


Figure 3

- **Puissance électromagnétique**

La puissance électromagnétique, notée P_{em} , est la portion de la puissance absorbée sous forme mécanique qui est convertie dans l'entrefer en énergie électrique :

$$P_{em} = EI_a = \frac{2p}{2a} Nn\phi I_a = UI + R_a I_a^2$$

- **Couple électromagnétique (résistant)**

Selon le principe de Laplace, un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique. Sur ce principe, le rotor de la machine est soumis à un couple électromagnétique qui, dans le cas du fonctionnement en génératrice, s'oppose au couple fourni par le dispositif d'entraînement (couple résistant) :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{EI_a}{\Omega} = \frac{2p}{2a} \frac{Nn\phi I_a}{\Omega} = \frac{2p}{2a} \frac{N\phi I_a}{2\pi} = K_c \phi I_a$$

C_{em} : couple électromagnétique en m.N), Ω : vitesse de rotation en rad.s⁻¹, avec : $K_c = \frac{2p}{2a} \frac{N}{2\pi}$

I.3. Les différentes configurations d'excitation

Il existe 4 modes d'alimentation (ou excitation) de l'inducteur : l'excitation séparée, l'excitation shunt, l'excitation série et excitation composée (compound).

- **Excitation séparée ou indépendante**

Une source d'alimentation auxiliaire (batterie, ou autre...) est nécessaire pour alimenter l'inducteur.

- **Excitation en dérivation ou shunt**

L'énergie nécessaire à la circulation d'un courant d'excitation pour la production du champ magnétique inducteur est délivrée l'enroulement d'induit, aussi l'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

- **Excitation série**

Dans ce mode d'excitation, l'enroulement inducteur est branché en série avec l'enroulement induit et le courant d'excitation est le même dans les deux circuits.

- **Excitation composée ou compound**

Dans ce mode d'excitation, la machine possède deux enroulements d'excitation destinés à la production du champ magnétique. L'un est branché en parallèle avec l'induit, l'autre est connecté en

Pour les excitations, shunt, série et compound, la génératrice ne nécessite pas de source auxiliaire d'excitation, la machine est qualifiée de génératrice auto-excitée lorsqu'elle fonctionne selon l'un de ces trois modes.

I.4. La réaction magnétique d'induit

Lorsqu'on branche un récepteur aux bornes de l'induit d'une génératrice à courant continu, l'induit débite un courant. Celui-ci crée un flux magnétique, appelé flux de réaction d'induit, qui modifie le flux produit par l'inducteur. Ce flux de réaction présente deux composantes :

- une composante de réaction transversale, dont la direction se situe sur l'axe interpolaire qui diminue le flux traversant l'induit et décale la ligne neutre magnétique.
- une composante de réaction longitudinale, située dans l'axe polaire, due au décalage de la ligne de neutre qui diminue fortement le flux inducteur.

La réaction magnétique d'induit a pour conséquence la diminution du flux utile, donc de la f.m.m par rapport à la marche à vide et une induction différente de zéro sous la ligne neutre théorique.

- **Expression de la réaction magnétique d'induit**

Du fait de ce phénomène, les équations de la machine sont modifiées de la manière suivante :

Le flux en charge s'écrit :

$$\phi_{ch} = f(I_{ex}, I_a) = \phi_v - \Delta\phi$$

à vide le f.e.m n'est causée que par la excitation :

$$E_v = \frac{2p}{2a} Nn\phi_v$$

en charge elle devient :
$$E_{ch} = \frac{2p}{2a} Nn\phi_{ch} = \frac{2p}{2a} Nn(\phi_v - \Delta\phi) = \left(\frac{2p}{2a} Nn\phi_v\right) - \left(\frac{2p}{2a} Nn\Delta\phi\right)$$

d'où :
$$E_{ch} = E_v - h_m \quad \text{avec :} \quad h_m = \frac{2p}{2a} Nn\Delta\phi$$

h_m : représentant la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit, ϕ_v : le flux produit par le courant d'inducteur, ϕ_{ob} : le flux causé par l'action conjuguée des courants d'inducteur et d'induit.

En tenant compte de la résistance de l'enroulement d'induit, la tension délivrée ses bornes peut alors être réécrite sous la forme :

$$U = E_{ch} - R_a I_a = E_v - (h_m + R_a I_a) = E_v - h_t$$

h_m : représentant la chute totale de tension : $h_t = h_m + R_a I_a = E_v - U$

• **Remèdes pour limiter l'influence de la réaction d'induit**

Les dispositions couramment employées pour diminuer l'influence de la réaction transversale d'induit sont :

- mise en œuvre d'enroulements de compensation logés dans des encoches pratiquées sous les pièces polaires créant une f.m.m. égale et opposée à celle due aux ampères tours de l'induit ;
- mise en œuvre pôles de commutation créant des ampères tours égaux et opposés à ceux de l'induit.
- Limitation de l'influence des ampères-tours dus au courant d'induit en prévoyant un entrefer plus important au voisinage des pièces polaires.

I.5. La génératrice à excitation indépendante

• **Schéma équivalent**

U_{ex} : Tension de la source d'excitation,
 R_{hd} : Rhéostat d'excitation (ou de champ),
 R_d : Résistance de l'enroulement inducteur,
 I_{ex} : Courant d'excitation,
 n : Vitesse de rotation

E_v : Force électromotrice,
 R_a : Résistance de l'enroulement induit,
 I_a : Courant d'induit,

I : Courant circulant dans la charge, U : Tension délivrée par l'induit, R_{ch} : Résistance de la charge.

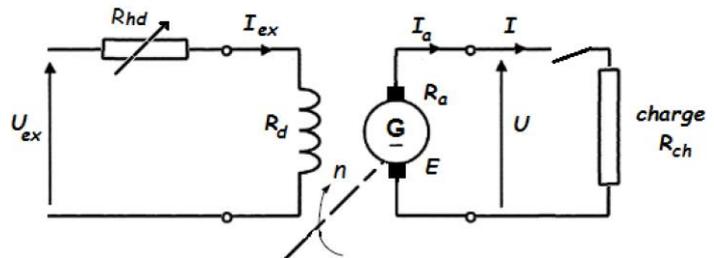


Figure 4

• **Caractéristique interne**

C'est la courbe $E_v = f(I_{ex})$ relevée à vide à vitesse $n = \text{constante}$.

C'est une courbe de magnétisation, en effet elle a la même allure que celle de l'induction $B = f(H)$, et :

- de O à A, la caractéristique est linéaire, $E_v = E_v \cdot I_{ex}$;
- de A à B le matériau ferromagnétique commence à saturer ;
- après B, le matériau est saturé, le f.é.m. n'augmente presque plus.

Pour des valeurs du courant d'excitations importantes, le circuit magnétique se sature et l'accroissement de la f.e.m est moins rapide.

La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage du point A.

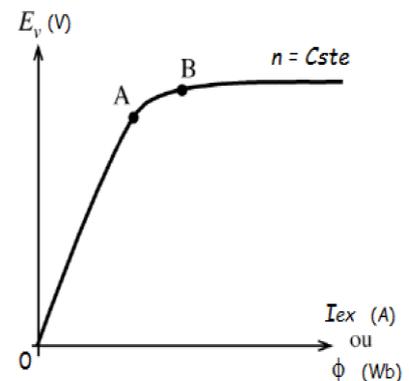


Figure 5

On vérifie pour deux régimes de fonctionnement, à $I_{ex} = \text{constante}$, que :
$$\frac{E_{v1}}{n_1} = \frac{E_{v2}}{n_2} \Rightarrow E_{v2} = E_{v1} \frac{n_2}{n_1}$$

- **Caractéristique externe**

C'est la courbe $U = f(I)$ relevée en charge, en maintenant constantes la vitesse n et le courant d'excitation I_{ex} .

Lorsque le courant I croît la tension aux bornes de la charge diminue, la caractéristique est donc décroissante et s'incurve de plus en plus à cause des chutes de tension ohmique et de réaction magnétique de l'induit.

Les différentes caractéristiques de chute de tension $h_t = f(I)$, $h_m = f(I)$, $\mu = f(I)$ peuvent être déduite par une méthode graphique ou à l'aide de calcul.

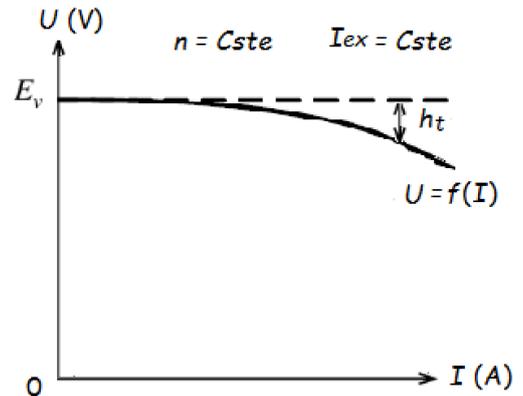


Figure 6

- **Bilan des puissances et rendement**

La valeur du rendement est déterminée soit :

- par la méthode directe par un essai en charge,
- par la méthode des pertes séparées.

Les différentes puissance mises en jeu lors du fonctionnement en charge de la génératrice à excitation indépendante sont :

- Puissance utile : $P_u = UI$
- Puissance absorbée par le circuit d'excitation : $P_{ex} = U_{ex} I_{ex}$
- Puissance mécanique : P_m
- Puissance absorbée : $P_{abs} = P_m + P_{ex}$
- Pertes supplémentaires (magnétiques, frottement, ventilation, ...) : $P_{méca}$
- Pertes joules dans l'induit : $P_{ja} = R_a I_a^2$
- Pertes joules dans l'inducteur : $P_{jex} = P_{ex} = (R_d + R_{hd}) I_{ex}^2$

Le rendement est calculé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}} = \frac{P_u}{P_u + P_{jex} + P_{ja} + P_m}$$

I.6. La génératrice à excitation shunt

- **Schéma équivalent**

Ce mode d'excitation permet de pas utilisée de source auxiliaire pour l'excitation.

- U : Tension délivrée par l'induit,
- R_{hd} : Rhéostat d'excitation (ou de champ),
- R_d : Résistance de l'enroulement inducteur,
- I_d : Courant d'excitation,
- n : Vitesse de rotation

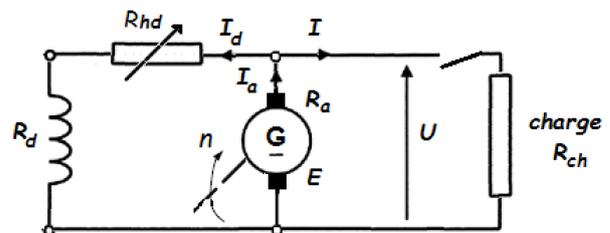


Figure 7

- E_v : Force électromotrice,
- R_a : Résistance de l'enroulement induit,
- I_a : Courant d'induit,

- I : Courant circulant dans la charge,
- R_{ch} : Résistance de la charge.

A vide, la tension aux bornes de l'induit étant appliquée au circuit d'excitation, d'où :

$$U_0 = U_{ex0} \approx E_v \quad \text{et} \quad I_{a0} = I_d \quad \text{avec} \quad I_d = \frac{E_v}{R_d + R_{hd}}$$

En charge, il vient : $U = U_{ex}$ et $I = I_a - I_d$ avec $I_d = \frac{U}{R_d + R_{hd}}$

• **Problème de l'amorçage**

La génératrice est dite amorcée si elle délivre une tension de l'ordre de sa tension nominale. La génératrice shunt ne s'amorce que sous certaines conditions.

La machine est entraînée à vide à sa vitesse nominale et excitée par un courant faible d'excitation.

L'interrupteur étant ouvert : $I_d = 0 \Rightarrow E_{vr} \ll U_n$ (E_{vr} désignant la f.e.m rémanente), à la fermeture de l'interrupteur, deux situations peuvent se présenter :

- soit : $E_v \uparrow \Rightarrow I_d = \frac{E_v}{R_d + R_{hd}} \uparrow \Rightarrow \phi \uparrow \Rightarrow E_v \uparrow \Rightarrow$ la génératrice s'amorce ;
- soit : $E_v \downarrow \Rightarrow I_d = \frac{E_v}{R_d + R_{hd}} \downarrow \Rightarrow \phi \downarrow \Rightarrow E_v \downarrow \Rightarrow$ la génératrice ne s'amorce pas.

Dans ce dernier cas, pour amorcer la génératrice, il suffit d'inverser soit, le sens de rotation, soit le courant d'excitation en permutant les connexions entre l'induit et l'inducteur. j

Par conséquent, les conditions d'amorçage sont :

- la vitesse de rotation suffisante (par exemple la vitesse nominale),
- l'existence de la f.e.m rémanente,
- le flux inducteur ϕ_i doit agir dans le même sens que le flux rémanent E_{vr} .

• **Caractéristique interne**

La caractéristique $E_v = f(I_{ex})$ ne dépend pas du mode d'excitation, car elle représente la courbe d'aimantation du circuit magnétique. Elle est toujours relevée à vide en génératrice à excitation séparée

A vide, la tension aux bornes de l'induit est : $U_0 = (R_d + R_{hd}) I_d \approx E_v$.

Le point de fonctionnement P_0 à vide est donc à l'intersection de la caractéristique $E_v = f(I_{ex})$ et de la droite des inducteurs d'équation $E_v \approx (R_d + R_{hd}) I_d$.

On peut déplacer le point de fonctionnement P_0 à vide par action sur le rhéostat R_{hd} , ou par action sur la vitesse de rotation n .

Action sur le rhéostat d'excitation R_{hd} :

- Si on augmente R_{hd} , la pente de la droite des inducteurs et le point de fonctionnement P_0 se déplace sur la gauche de la caractéristique $E_v = f(I_{ex})$.
- A la limite de $R_{hd} = R_{hd\ cr}$ (valeur critique), le point de fonctionnement n'est plus défini et la machine se désamorce.

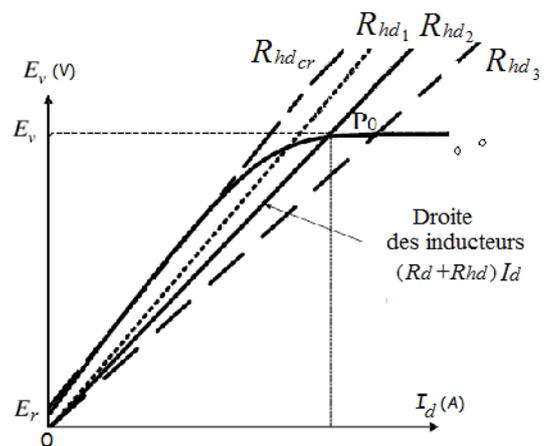


Figure 8

Il faut noter que pour une valeur de la vitesse de rotation correspond une valeur critique pour la résistance du rhéostat.

La valeur de la résistance critique du rhéostat d'excitation peut être déterminé dans la zone linéaire.

Action sur la vitesse de rotation n :

- Si on diminue la vitesse n , la caractéristique va se déplacer par affinité vers le bas et le point de fonctionnement P_0 va se descendre vers le bas sur la droite des inducteurs.
- A la limite pour une vitesse critique $n = n_{cr}$, le point de fonctionnement n'est plus défini et la génératrice se désamorce.

Il faut aussi noter que pour une valeur de la résistance du rhéostat correspond une valeur critique de la vitesse de rotation.

La valeur critique de la vitesse peut également être déterminé dans la zone linéaire.

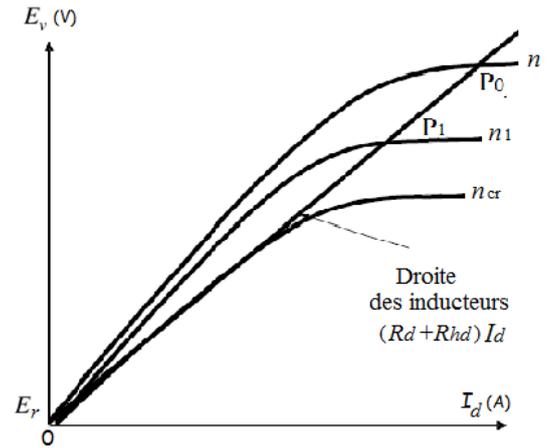


Figure 9

• **Caractéristique externe**

C'est la courbe $U = f(I)$ relevée en charge, en maintenant constantes la vitesse n et la valeur du rhéostat d'excitation R_{hd} .

La caractéristique externe d'une génératrice excitée en dérivation est plus tombante que celle relevée pour l'excitation indépendante.

En effet, contrairement à l'excitation séparée, le courant d'excitation n'est plus constant, il décroît en même temps que la valeur de U , d'où la baisse plus accentuée de la tension.

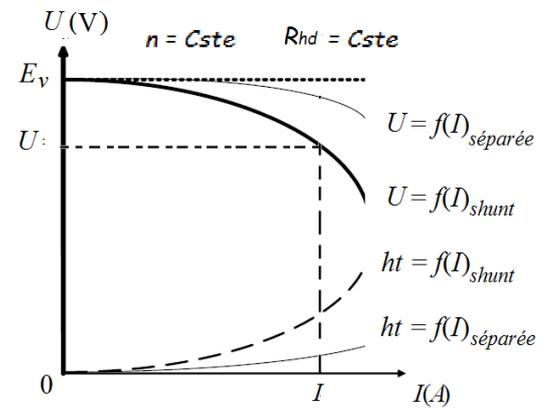


Figure 10

En conséquence les chutes de tension magnétique et totales ne peuvent plus être déterminées par les relations définies précédemment, le courant d'excitation changeant avec la charge, la f.e.m à vide sera également modifiée.

• **Construction de Picou**

Les caractéristiques de chute de tension $h_t = f(I)$ et $h_m = f(I)$, peuvent être déduite par la construction graphique de Picou.

A partir des caractéristiques $E_v = f(I_{ex})$, $U = f(I)$ à $n = cste$ et à $R_{hd} = cste$, relevées à la même vitesse, tracées à la même échelle de part et d'autre de l'axe des tensions et la droite des inducteurs ; on peut prédéterminer

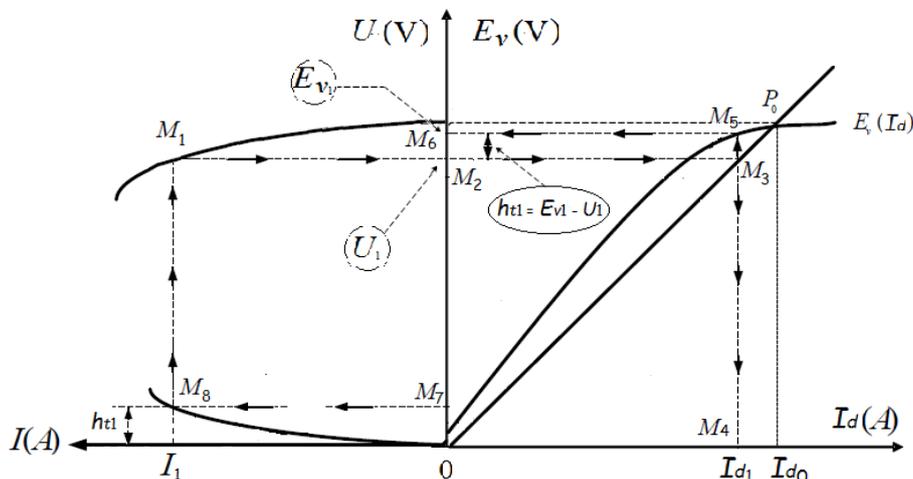


Figure 10

la courbe de chute de tension totale pour le fonctionnement en mode dérivation.

La marche à suivre est la suivante :

Pour un courant I_1 correspondant à un régime de fonctionnement noté (1) :

- Le courant $I_1 \rightarrow$ le point M1 sur la caractéristique $U = f(I) \rightarrow$ le point M2 sur l'axe des tensions donne U_1 le point M2 ;
- le point M2 \rightarrow le point M3 sur la droite des inducteurs ;
- le point M3 \rightarrow le point M4 permet d'obtenir l'intensité du courant d'excitation I_d ;
- le point M4 \rightarrow le point M5 sur la caractéristique interne $E_v = f(I_{ex})$;
- point M5 \rightarrow le point M6 sur l'axe des f.e.m(s) donne E_{v1} .

Et donc : $h_{m1} = \overline{M2M6} = E_{v1} - U_1$, en reportant sur l'axe des tensions $h_{m1} = \overline{M2M6} = \overline{OM7}$, on obtient le point de la caractéristique $h_t = f(I)$ pour le courant I_1 de charge considéré.

On refait cette construction pour plusieurs courants afin d'obtenir les chutes de tension correspondantes.

Connaissant la résistance de l'induit, on trace la courbe de chute ohmique $\mu = f(I)$ et on en déduit la caractéristique $h_m = f(I)$ de la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit par la relation :
 $h_m = h_t - R_a I_a$.

• Bilan des puissances et rendement

Les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement en charge de la génératrice shunt sont :

- Puissance utile : $P_u = UI$
- Puissance absorbée : $P_{abs} = P_m$
- Pertes supplémentaires (magnétiques, frottement, ventilation, ...) : $P_{méca}$
- Pertes joules dans l'induit : $P_{ja} = R_a I_a^2$
- Pertes joules dans l'inducteur : $P_{jex} = (R_d + R_{hd}) I_d^2 = UI_d$

Le rendement est calculé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}} = \frac{P_u}{P_u + P_{jex} + P_{ja} + P_m}$$

II. MOTEUR A COURANT CONTINU

II.1. Réversibilité de la machine à courant continu

La machine à courant continu est réversible, c'est-à-dire que la constitution d'une génératrice (G) est identique à celle du moteur (M). Dans une génératrice, on met la machine en rotation pour obtenir de l'énergie électrique. Dans un moteur, on applique une tension électrique la machine pour obtenir la rotation.

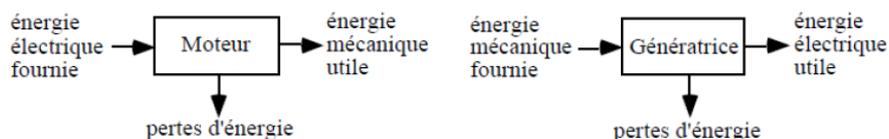


Figure 11

En fonctionnement moteur, l'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. L'induit est alimenté par une source de courant continu. Le champ inducteur agit sur ses conducteurs en leur appliquant des forces électromagnétiques. Ces forces électromagnétiques produisent un couple moteur qui entraîne l'induit en rotation.

II.2. Comportement mécanique selon le mode d'excitation

- **Excitation séparée ou indépendante**

Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une vitesse de rotation indépendante de la charge et réglable par action sur la tension d'induit ou sur le courant d'excitation.

- **Excitation dérivation ou shunt**

Les propriétés du moteur à excitation dérivation sont les mêmes que celle du moteur à excitation indépendante. Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation pratiquement indépendante de la charge et qui peut démarrer à vide.

- **Excitation série**

La vitesse de rotation du moteur varie beaucoup avec la charge et ce type de moteur a tendance à s'emballer à vide ou sous faible charge.

II.3. Modélisation du moteur à courant continu

- **Expression de la force contre électromotrice**

L'enroulement induit en mouvement dans le champ magnétique produit par l'inducteur est le siège d'une force contre électromotrice (f.c.e.m) E' à ses bornes.

Cette f.c.e.m est proportionnelle au nombre de conducteurs actifs de l'induit, à la vitesse de rotation n de l'induit, au flux Φ dans l'entrefer. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E' = \frac{2p}{2a} Nn\phi$$

E' : f.c.é.m en Volts, n : vitesse de rotation de l'induit en tr/s, ϕ : flux magnétique maximum traversant les enroulements de l'induit en webers, N : nombre de conducteurs actifs de l'induit, $2p$: Nombre de voie d'enroulement, $2a$: Nombre de voie d'enroulement (on adopte : $2p/2a=1$).

En fait cette force électromotrice est de même nature que la f.e.m d'une génératrice, la différence entre les deux types de fonctionnement est le sens du courant induit qui s'inverse dans le fonctionnement en moteur.

- **Tensions aux bornes des enroulements**

En appliquant à l'induit la convention récepteur, la tension qu'il délivre à ses bornes s'exprime sous la forme :

$$U = E + R_a I_a$$

U et E : tension et f.e.m en Volts,

R_a : résistance de l'induit en Ohms,

I_a : courant d'induit en ampères.

La convention récepteur appliquée à l'inducteur donne :

$$U_{ex} = R_{ex} I_{ex}$$

U_{ex} : tension en Volts, R_{ex} : résistance de l'inducteur en

Ohms et I_{ex} : courant d'inducteur en ampères.

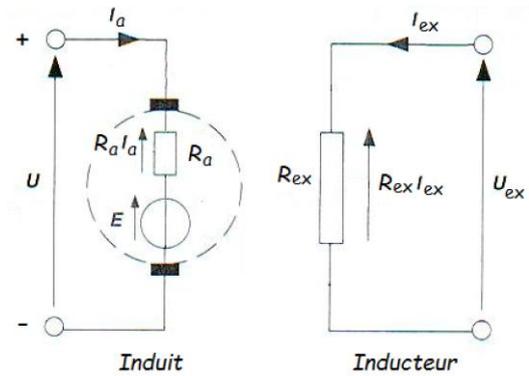


Figure 12

- **Vitesse de rotation**

En considérant la machine correctement compensée (réaction magnétique d'induit négligée), elle s'obtient à partir de l'expression de la force contre-électromotrice, soit :

$$n = \frac{2a}{2p} \cdot \frac{U - R_a I_a}{N\phi} \quad \text{ou} \quad n = \frac{2a}{2p} \cdot \frac{U - R_a I_a}{N\phi} \quad \text{si} \quad 2p = 2a$$



Lorsque le flux est nul la vitesse tend vers l'infini, le moteur s'emballe !!!

- **Puissance électromagnétique**

La puissance électromagnétique, notée P_{em} , est la portion de la puissance absorbée sous forme électrique qui est convertie dans l'entrefer en énergie mécanique :

$$P_{em} = EI_a = \frac{2p}{2a} Nn\phi I_a = UI + R_a I_a^2$$

- **Couple électromagnétique**

Selon le principe de Laplace, un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique. Sur ce principe, le rotor de la machine est soumis à un couple électromagnétique qui entraîne en rotation le dispositif mécanique entraîné :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{EI_a}{\Omega} = \frac{2p}{2a} \frac{Nn\phi I_a}{\Omega} = \frac{2p}{2a} \frac{N\phi I_a}{2\pi} = K_c \phi I_a$$

C_{em} : couple électromagnétique en m.N), Ω : vitesse de rotation en rad.s⁻¹, avec : $K_c = \frac{2p}{2a} \frac{N}{2\pi}$

En fait, le couple effectif (couple utile : C_u) agissant sur le dispositif entraîné est inférieur au couple électromagnétique, en effet il existe toujours un couple de pertes C_p résistant à la rotation, dut en autre aux frottements, à la ventilation, ...

Le couple utile est exprimé par la relation suivante :

$$C_u = C_{em} - C_p$$

II.4. Inversion du sens de rotation

L'inversion du sens de rotation est obtenue en inversant, le moteur à l'arrêt, le sens du courant soit dans l'enroulement d'inducteur, soit dans l'enroulement d'induit, c'est-à-dire en modifiant les connexions de l'un ou de l'autre sur la plaque à bornes.

En pratique, on préfère généralement la première méthode, celle-ci étant la plus simple.

II.5. Le problème du démarrage

En régime établi, le courant d'induit a pour expression (réaction magnétique d'induit compensée) :

$$I_a = \frac{U - E'}{R_a} \quad \text{avec} \quad E' = K.n.\phi$$

A l'arrêt la vitesse est nulle, par conséquent la f.c.e.m l'est également, d'où l'expression du courant d'induit appelé au décollage : $I_{ad} = U/R_a$.

L'enroulement d'induit est alors équivalent à une résistance R_a de valeur faible, et donc l'intensité I_{ad} , prend pendant cette phase une valeur très importante (plusieurs fois le courant nominal).

Le moteur prenant de la vitesse, la f.c.e.m croît et le courant diminue pour se stabiliser à une valeur acceptable et dépendante de la charge mécanique entraînée. Or l'intensité du courant de démarrage ne doit pas dépasser la limite admissible fixée par le constructeur. Il est donc nécessaire de limiter la pointe de courant durant la phase de démarrage.

Au regard de la relation précédant, deux procédés peuvent être utilisés par :

- Action sur la résistance du circuit d'induit par insertion d'une résistance en série avec l'induit ;
- Action sur la tension d'induit par application d'une tension d'induit réduite.

II.6. Le phénomène d'emballement

En pratique, la chute de tension ohmique ($R_a \cdot I_a$) ne dépasse quelques % de la tension appliquée, ce qui permet d'exprimer la vitesse sous la forme :

$$n \approx \frac{U}{K \cdot \Phi} = \frac{U}{K \cdot \phi(I_{ex})}$$

On constate, que pour une tension d'alimentation fixée, la vitesse est inversement proportionnelle au flux, et donc dans le cas d'une coupure du courant d'excitation, l'induit étant toujours sous tension :

$$I_{ex} = 0 \quad \Rightarrow \quad \phi = \phi_{remanent} \approx 0, \quad \text{et donc :} \quad \lim(n) = \infty \quad \text{lorsque :} \quad \phi \rightarrow 0 \quad !!!$$

Ce qui correspond à une accélération violente de l'arbre moteur, la vitesse tend alors vers une valeur non admissible pour le moteur (contraintes mécaniques excessives sur les conducteurs de l'induit, les cales et toutes les pièces en rotation). La vitesse atteinte sera d'autant plus grande que la tension d'alimentation sera élevée.

C'est le phénomène d'emballement, il peut avoir pour conséquence la destruction du moteur, si sa tension d'alimentation n'est pas rapidement coupée.



**La rupture du circuit d'excitation a pour conséquence l'emballement du moteur.
Il est donc nécessaire de porter un soin particulier à son branchement.
Ne jamais y insérer de fusible ou de dispositif de coupure**

II.7. Réglage de la vitesse

Le réglage de la vitesse des moteurs à courant continu dans une large plage de variation est relativement simple.

En effet, l'expression la vitesse montre qu'elle est non seulement inversement proportionnelle au flux, c'est-à-dire au courant d'excitation, mais également à la tension appliquée aux bornes de l'induit.

On peut donc définir les deux procédés de réglage de vitesse suivant :

- **Réglage par action sur la tension d'induit**

Il consiste à faire varier le courant d'excitation à l'aide du rhéostat de champ, en gardant la tension d'alimentation constante, ce qui a pour effet de modifier la valeur de la vitesse :

$$\begin{array}{l} \text{soit :} \quad R_{hd} \uparrow \Rightarrow I_{ex} \downarrow \Rightarrow \phi \downarrow \Rightarrow n \uparrow \\ \text{et :} \quad R_{hd} \downarrow \Rightarrow I_{ex} \uparrow \Rightarrow \phi \uparrow \Rightarrow n \downarrow \end{array}$$

C'est un procédé de réglage simple, efficace et largement employé pour les essais de machines tournantes.

Toutefois, sachant que le démarrage du moteur doit toujours être effectué à flux maximal (rhéostat de champ court-circuité), si la tension nominale est appliquée alors nous n'avons plus la possibilité de diminuer la vitesse.

Dans ces conditions ce procédé est utilisé pour faire croître la vitesse au de la de sa valeur nominale (tout en respectant sa valeur maximale).

- **Réglage par action sur courant d'excitation**

Il s'agit de régler la tension d'alimentation, sans modifier le rhéostat d'excitation, ce qui a pour effet de modifier la valeur de la vitesse :

$$\begin{aligned} \text{soit :} & \quad U \uparrow \quad \Rightarrow \quad n \uparrow \\ \text{et :} & \quad U \downarrow \quad \Rightarrow \quad n \downarrow \end{aligned}$$

Si le flux est réglé à sa valeur maximale, la tension d'alimentation étant limitée à sa valeur normale, cette méthode ne permet pas l'augmentation de la vitesse au-dessus la valeur nominale.

Ce mode de réglage simple autorise la réduction à volonté de la vitesse du moteur, mais présente l'inconvénient de nécessiter une alimentation continue réglable.

II.8. Le moteur shunt

- **Schéma équivalent**

Ce mode d'excitation permet de pas utilisée de source auxiliaire pour l'excitation.

- U : Tension d'alimentation,
- R_{hd} : Rhéostat d'excitation (ou de champ),
- R_d : Résistance de l'enroulement inducteur,
- I_d : Courant d'excitation,
- n : Vitesse de rotation

- E : Force contre électromotrice,
- R_a : Résistance de l'enroulement induit,
- I_a : Courant d'induit.

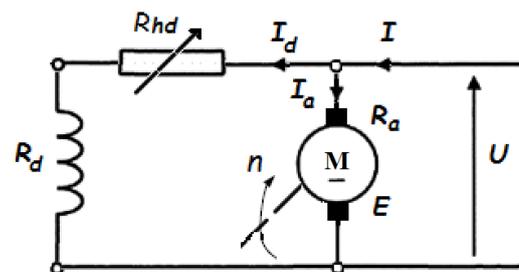


Figure 13

I : Courant absorbé par le moteur,

$$I = I_a + I_d \quad \text{avec} \quad I_d = \frac{U}{R_d + R_{hd}}$$

- **Caractéristiques de vitesse à vide**

La caractéristique $n = f(I_d)$ à courant d'excitation variable a l'allure d'une portion d'hyperbole.

Pour un courant d'excitation constant (c'est-à-dire à flux constant), la fréquence de rotation à vide est proportionnelle à la tension d'alimentation. La caractéristique $n = f(U)$ pour I_d constant est donc une droite.

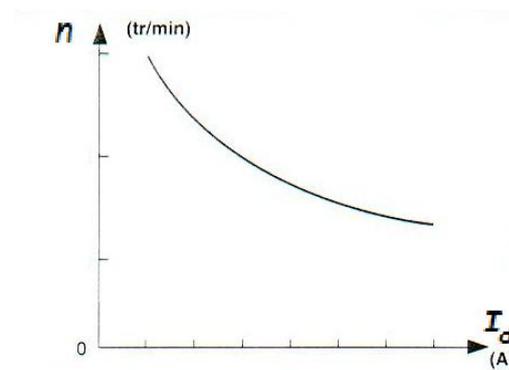


Figure 14

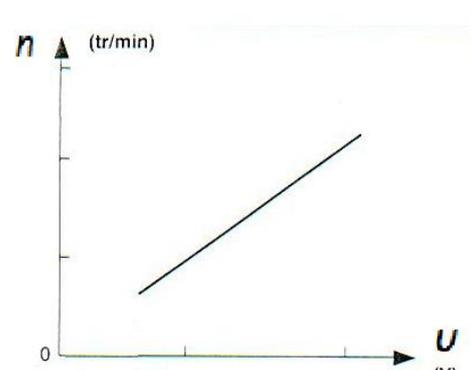


Figure 15

- **Caractéristique électromécanique de vitesse**

Pour une tension d'alimentation constante et un courant d'excitation constant, la vitesse de rotation en charge diminue faiblement quand le courant absorbé par le moteur augmente. La caractéristique en charge $n = f(I)$ pour U et I_d constants est une droite. Le moteur shunt est autorégulateur de vitesse

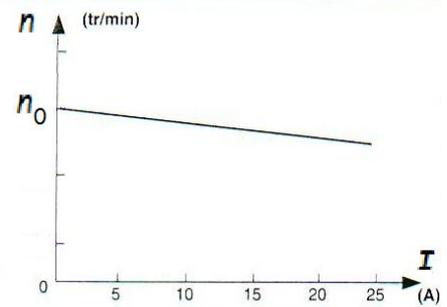


Figure 16

- **Caractéristique électromécanique de couple**

La caractéristique électromagnétique $C_{em} = f(I)$ pour U et I_d constants est une droite passant par l'origine ($C_{em} = k \cdot I$).

- **Caractéristique mécanique**

La caractéristique mécanique $C_{em} = f(n)$ pour U et I_d constants est une droite. La vitesse de rotation du moteur diminue peu lorsque la charge augmente. Le couple de démarrage est important.

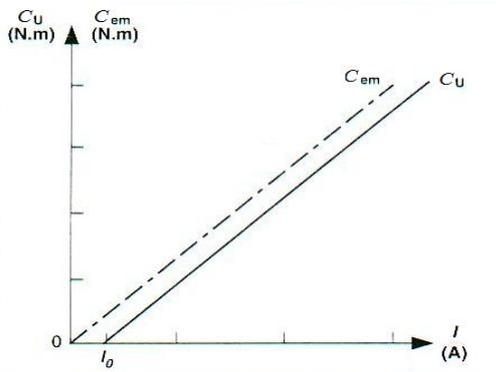


Figure 17

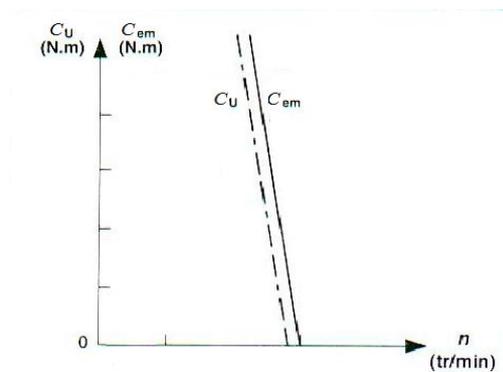


Figure 18

- **Bilan des puissances et rendement**

Les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement en charge du moteur shunt sont :

- Puissance absorbée : $P_{abs} = UI$
- Puissance utile : $P_u = C_u \Omega$
- Pertes supplémentaires (magnétiques, frottement, ventilation, ...): $p_{méca} = C_p \Omega$
- Pertes joules dans l'induit : $P_{ja} = R_a I_a^2$
- Pertes joules dans l'inducteur : $P_{jex} = (R_d + R_{hd}) I_d^2 = UI_d$

Le rendement est calculé par la relation suivante :

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

II.9. Le moteur série

- **Schéma équivalent**

U : Tension d'alimentation,

$I = I_a = I_s$: Courants absorbé par le moteur, d'induit et d'excitation,

R_a : Résistance de l'enroulement induit,

R_s : Résistance de l'enroulement inducteur,

$R_t = R_a + R_s$: Résistance totale du moteur,

n : Vitesse de rotation, E : Force contre électromotrice.

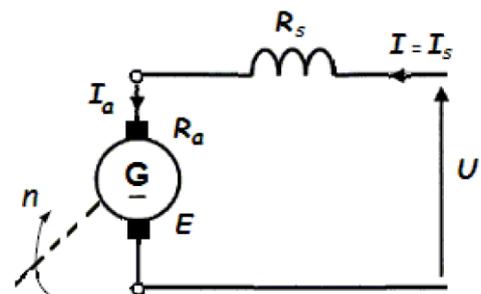


Figure 19

Le moteur à excitation série a la particularité d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant que l'induit, donc beaucoup plus important que celui des machines à excitation indépendante ou shunt. L'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines.

En raison du courant d'excitation élevé, pour avoir un flux du même ordre que les autres types de machines, le nombre de spires doit être diminué et la section doit être augmentée. D'où une résistance plus faible.

$$U = E' + R_a I_a + R_s I_s \Rightarrow U = E' + (R_a + R_s) I \Rightarrow U = E' + R_t I$$

avec :

$$U = N n \phi(I) N + R_t I$$

Donc :

$$n = \frac{U - R_t I}{N \phi(I)}$$

A vide : $I \approx 0$, donc $\phi(I) \rightarrow 0$ et n tend vers l'infini.



Un moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide sous tension nominale.

- **Caractéristique électromécanique de vitesse**

Pour une tension d'alimentation constante, la vitesse de rotation en charge diminue quand le courant absorbé par le moteur augmente. La caractéristique en charge $n = f(I)$ pour U constant est une portion d'hyperbole.

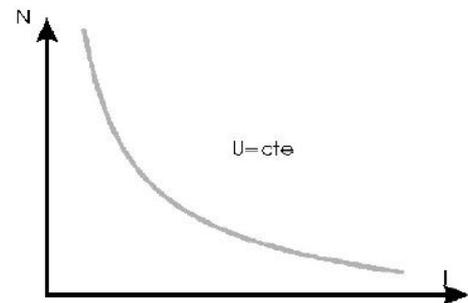


Figure 20

- **Caractéristique électromécanique de couple**

La caractéristique électromagnétique $C_{em} = f(I)$ pour U est donc de forme parabolique ($C_{em} = k \cdot I^2$).

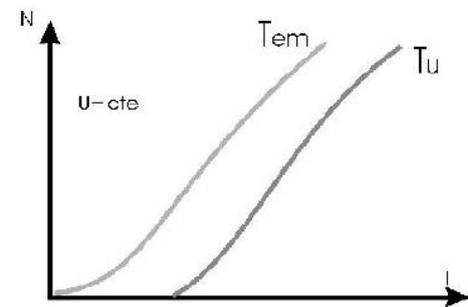


Figure 21

- **Caractéristique mécanique**

La caractéristique mécanique $C_{em} = f(n)$ pour U constants est de forme hyperbolique. Le moteur série est autorégulateur de puissance.

- **Réglage de la vitesse de rotation**

Pour réduire le flux magnétique par pôle, et augmenter la vitesse dans des proportions raisonnables, on place un rhéostat en parallèle avec l'inducteur.

- **Bilan des puissances et rendement**

Les différentes puissances mises en jeu lors du fonctionnement en charge du moteur série sont :

- Puissance absorbée : $P_{abs} = UI$
- Puissance utile : $P_u = C_u \Omega$
- Pertes supplémentaires : $P_{méca} = C_p \Omega$
- Pertes joules totales : $P_{jt} = (R_a + R_s) I^2 = R_t I^2$

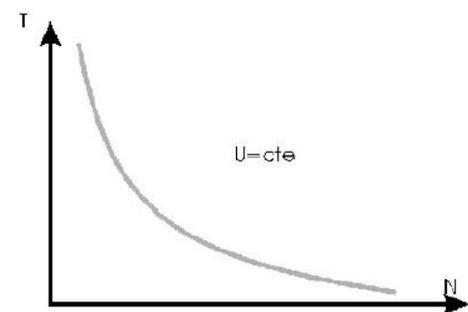


Figure 22

Le rendement est calculé par la relation suivante :

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