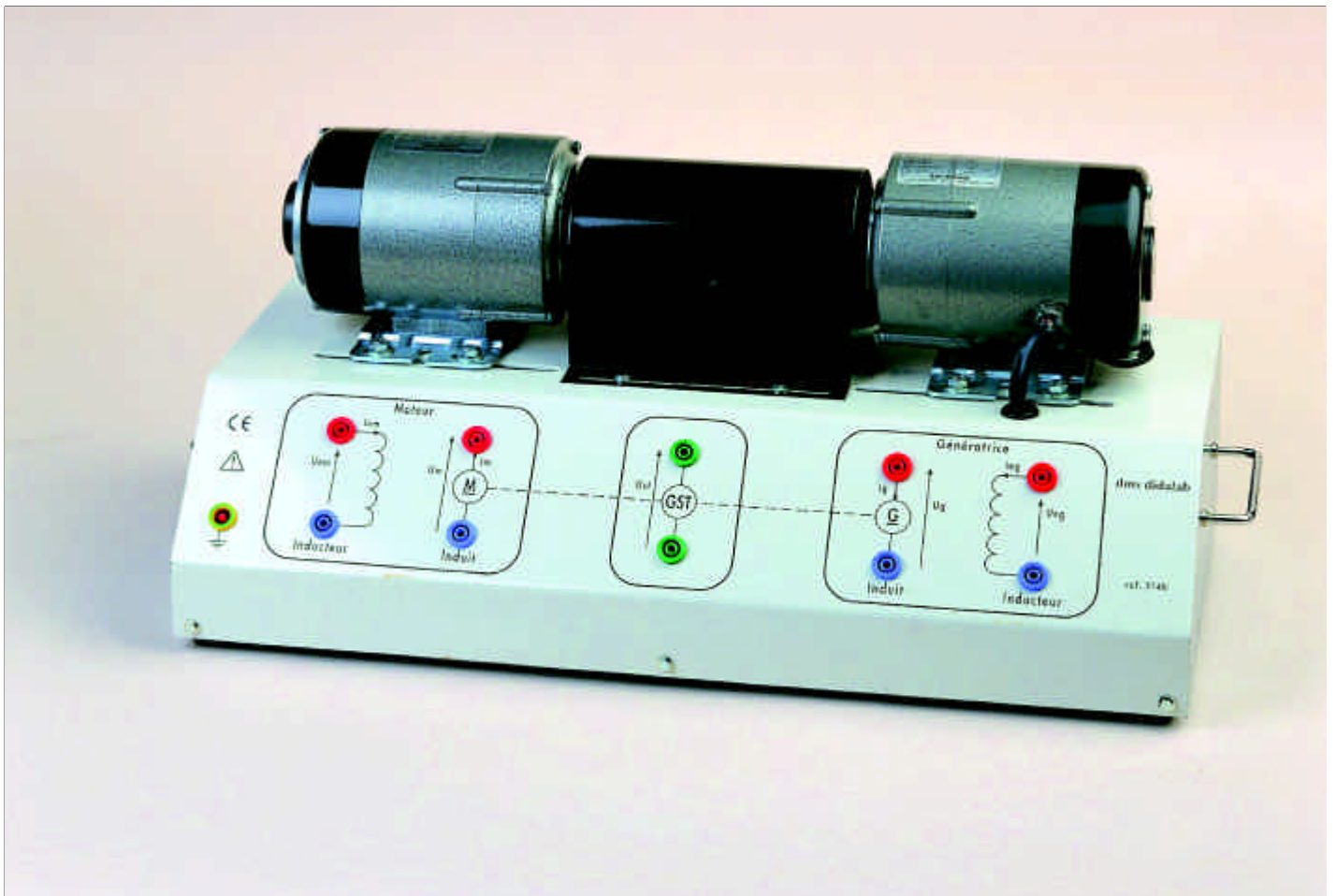


# ELD037480

## Moteur à Courant Continu à Excitation Indépendante

**Marc DEMONCHY et Robert LE GOFF**  
**Professeurs**  
**L.S.I Gustave EIFFEL - CACHAN**



Date de révision: 20/05/08

Z.A. de la Clé St Pierre  
5, rue du Groupe Manoukian  
78990 ELANCOURT  
Tél. : (33) 01 30 66 08 88  
Fax : (33) 01 30 66 72 20

Réf. : ELD037480



## ***MACHINE A COURANT CONTINU A EXCITATION INDEPENDANTE***

Une machine à courant continu est un convertisseur 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  $T$  tournant à la vitesse angulaire  $\Omega$ . L'énergie électrique se présente sous la forme de tension et courant unidirectionnels.

### **1. DESCRIPTION**

Une machine à courant continu est formée d'un circuit magnétique, d'un ou plusieurs circuits électriques et d'un collecteur (fig.1).

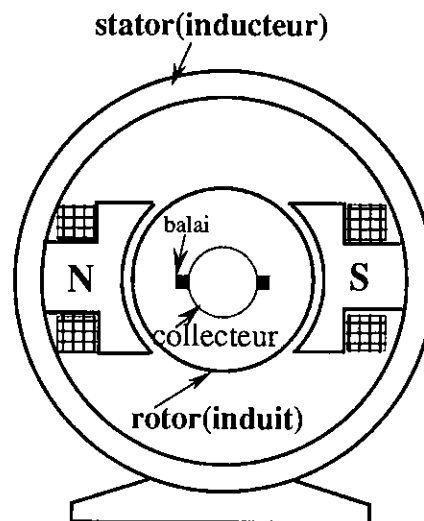


Figure 1

Le circuit magnétique est constitué de deux parties, l'une fixe (le stator) et l'autre mobile (le rotor), séparées par un entrefer.

Le ou les circuits électriques forment la source de champ magnétique (inducteur) généralement placée au stator.

Elle peut être constituée d'aimants permanents (la machine a alors un seul circuit électrique : l'induit) ou d'un courant traversant un bobinage (la machine a alors deux circuits électriques : l'inducteur et l'induit).

Un collecteur permet la liaison de l'induit au circuit extérieur de la machine par l'intermédiaire des balais.

Dans le cas d'une machine à deux circuits électriques, il existe plusieurs possibilités de branchement. Les deux plus utilisées sont :

- inducteur(source de champ) indépendant de l'induit : c'est une machine à excitation séparée (ou indépendante)
- inducteur et induit en série : c'est une machine à excitation série.

## 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

### 2.1 FORCE ELECTROMOTRICE.

- *Cas d'une machine fictive à une spire*

Prenons l'exemple de la machine très simplifiée de la figure 2 : la machine possède une paire de pôles, deux encoches dans chacune desquelles un conducteur est logé.

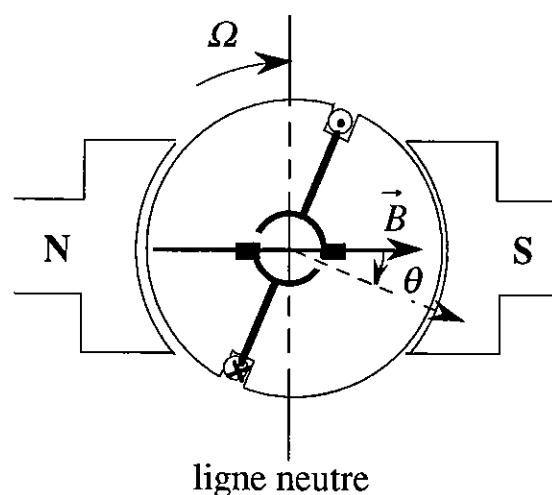


Figure 2

Avec les conventions imposées sur la figure, nous obtenons  $\theta = \Omega t$  (avec la condition initiale  $\theta = 0$  pour  $t = 0$ ).

En admettant que le flux embrassé par une spire est une fonction sinusoïdale de  $\theta$ , nous avons :

$$\varphi = \Phi \cos\theta = \Phi \cos \Omega t$$

La spire est alors le siège d'une f.é.m. induite (loi de Faraday) :

$$e_s = - \frac{d\phi}{dt} = \Phi \Omega \sin \Omega t$$

*Remarque :*

*En réalité le flux n'est pas sinusoïdal et la f.é.m. n'est pas rigoureusement sinusoïdale.*

Les balais sont disposés dans un plan passant par l'axe des pôles. Lorsque  $\theta$  est compris entre 0 et  $\pi$ , la f.é.m.  $e$  de la machine est la f.é.m.  $e_s$  aux bornes de la spire. Lorsque  $\theta$  est compris entre  $\pi$  et  $2\pi$  (fig.3), la f.é.m.  $e$  de la machine est l'opposé de la f.é.m.  $e_s$  aux bornes de la spire.

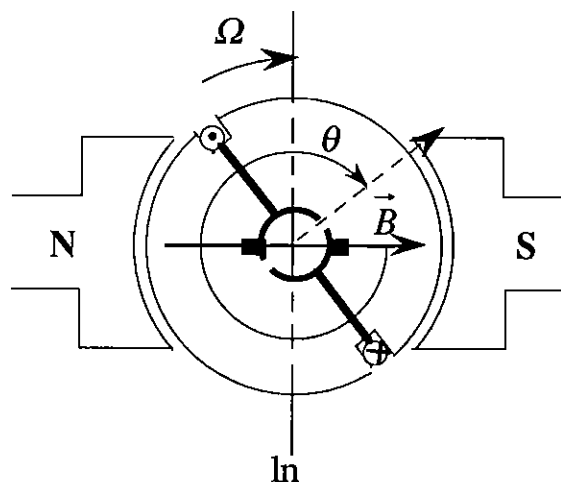


Figure 3

Quelle que soit la valeur de  $\theta$  nous avons donc :

$$e = |e_s| = \Phi \Omega |\sin \Omega t|$$

L'ensemble balais-collecteur est un redresseur mécanique.

La valeur moyenne de la fonction  $|\sin x|$  étant égale à  $2/\pi$ , la valeur moyenne  $E$  de la f.é.m.  $e = \Phi \Omega |\sin \Omega t|$  est :

$$E = \frac{2}{\pi} \Phi \Omega$$

En posant  $2/\pi = k$ , nous obtenons :

$$E = k \Phi \Omega$$

$E$  en volts (V),  $\Phi$  en wébers (Wb) et  $\Omega$  en radians par seconde (rad/s).

• *Cas de la machine réelle*

L'induit de la machine réelle comporte un grand nombre d'encoches dans lesquelles sont répartis  $N$  conducteurs pour former  $N/2$  spires.

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.

La figure 4 illustre une machine bipolaire à  $N = 16$  conducteurs (donc 8 spires) avec deux conducteurs par encoche et à 2 voies d'enroulement.

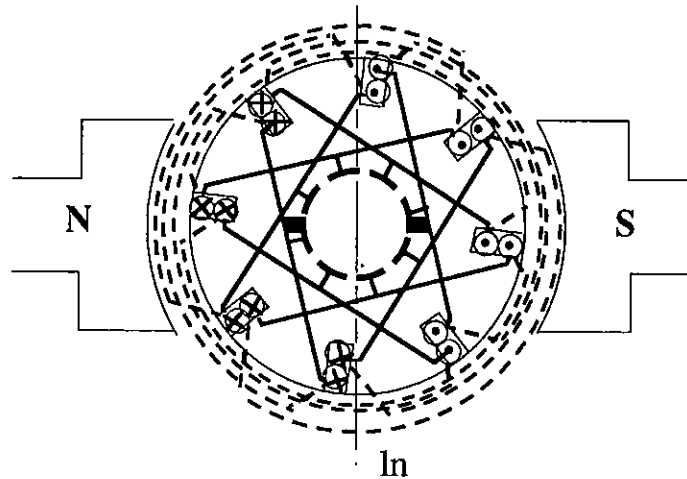


Figure 4

Si  $l$  désigne le nombre de lames du collecteur et  $n$  la vitesse de la machine, on montre que la f.é.m. instantanée de la machine est formée d'une succession de petites calottes (fig.5) de sinusoides (avec un flux supposé sinusoidal) d'amplitude maximale  $\hat{e}$  proche de  $E = \frac{N\Phi\Omega}{2\pi}$ .

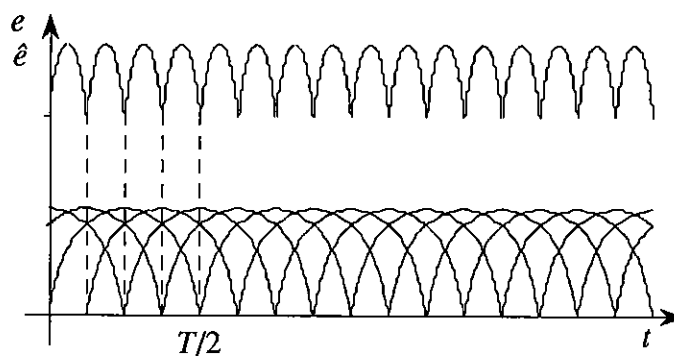


Figure 5

Lorsque le nombre de conducteurs est important, la valeur moyenne  $E$  de  $e$  est sensiblement égale à  $\hat{e}$ ; donc :

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

Dans le cas d'une machine à  $p$  paires de pôles et  $a$  paires de voies d'enroulement, la f.é.m. a pour expression :

$$E = \frac{p}{a} Nn\Phi$$

*Remarque :*

*Comme en réalité le flux n'est pas sinusoïdal (fig.6), la f.é.m. induite est encore moins ondulée que sur la représentation de la figure 5.*

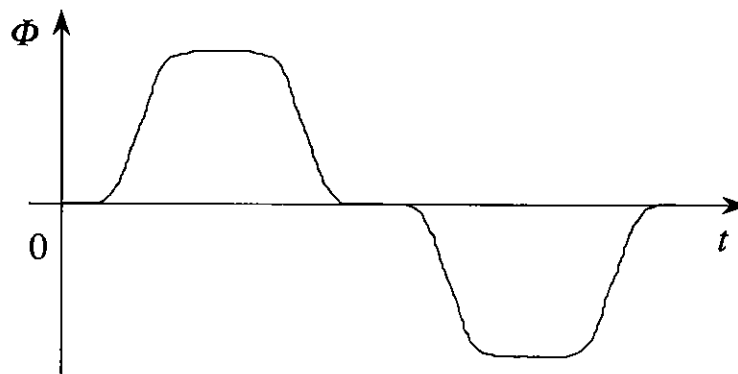


Figure 6

## 2.2 REACTION MAGNETIQUE D'INDUIT

### • Réaction transversale

Chaque conducteur de l'induit traversé par un courant continu génère un champ magnétique dont les lignes de champ sont canalisées par le circuit magnétique comme cela est représenté sur la figure 7. Le champ magnétique résultant est orthogonal au champ magnétique créé par l'inducteur, ce qui se traduit par une rotation du champ total  $B_c$  dans le sens de rotation de l'induit (pour un fonctionnement en génératrice et dans le sens inverse pour un moteur).

La ligne neutre en charge devient différente de la ligne neutre à vide (elle dépend aussi de la valeur de l'intensité du courant de l'induit).

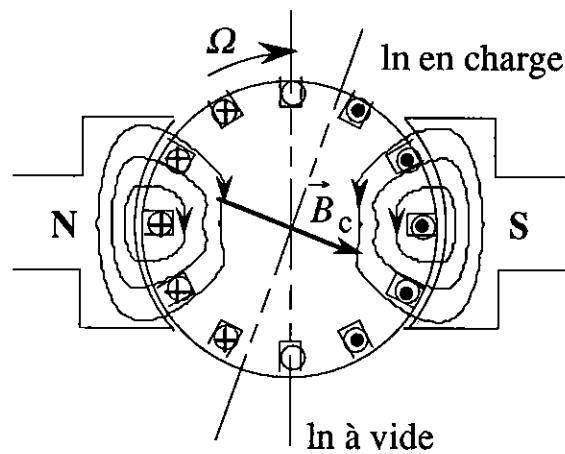


Figure 7

- *Réaction longitudinale*

Elle intervient quand il y a un décalage des balais (dans le sens de rotation pour une génératrice) :

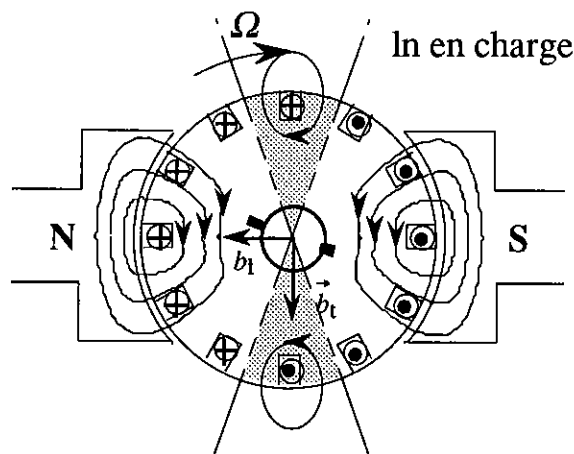


Figure 8

Sur la figure 8, on constate que les deux conducteurs placés dans le même plan vertical forme l'équivalent d'une spire qui crée un champ magnétique s'opposant au champ de l'inducteur. Pour une machine avec un nombre plus important d'encoches et de conducteurs actifs, tous les conducteurs situés dans l'intervalle angulaire correspondant à deux fois l'angle de décalage des balais (zone grisée sur le schéma) créent un champ longitudinal  $\vec{b}_l$ . Les autres conducteurs créent un champ transversal  $\vec{b}_t$ .

- *Conséquences*

Une machine à courant continu ayant un fonctionnement légèrement saturé, cette réaction d'induit provoque une diminution du flux et par conséquent de la f.é.m.



Pour diminuer cet effet on peut :

- soit décaler les balais dans le sens de rotation pour une génératrice (ceci ne peut être satisfaisant que pour une valeur particulière de  $I$ ), mais ce décalage crée une réaction transversale (voir ci-après)

- soit rajouter un enroulement de compensation qui doit être branché en série avec l'induit (remède efficace quelle que soit la valeur de  $I$ ).

### 2.3 COMMUTATION

#### • Phénomène

Il y a commutation lorsqu'une section de conducteurs passe d'une voie d'enroulement à la suivante. Ce passage se fait par l'intermédiaire des balais et durant ce passage, la section qui commute est mise en court-circuit : le courant dans la section doit s'inverser pendant ce court-circuit.

Effectuons un développement panoramique de l'induit. La description du phénomène de commutation peut se faire à partir des trois étapes représentées sur les figures 9a, 9b, et 9c.

Dans un premier temps, nous supposons les lames III et VII du collecteur d'une machine à huit lames au collecteur, en contact avec les balais (fig.9a).

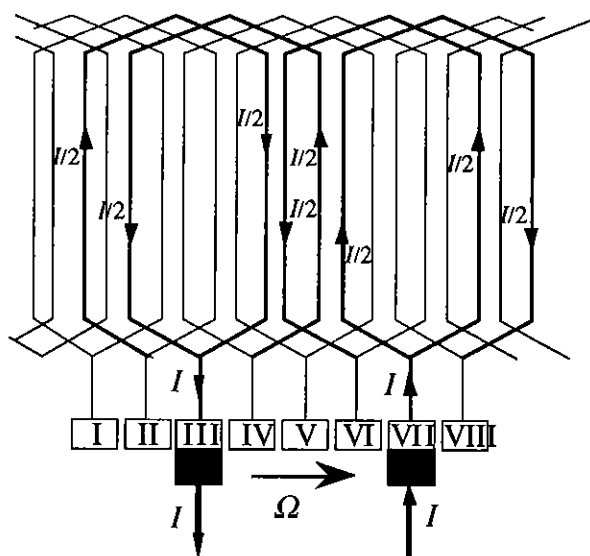


Figure 9a

Une commutation est achevée lorsque les lames II et VI se retrouvent en contact avec les balais (fig.9c). Il s'est écoulée une durée pendant laquelle il y a eu court-circuit (fig.9b) de deux sections (une par balai). L'intensité du courant traversant chaque section en commutation passe de  $+I/2$  à  $-I/2$ . Cette inversion se fait au passage de la ligne neutre.

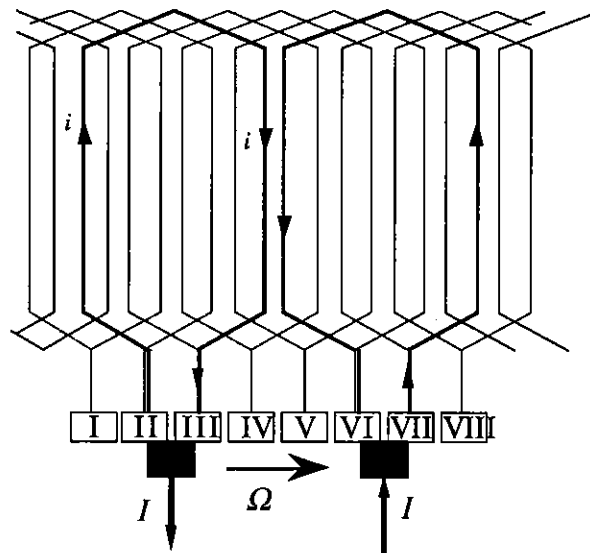


Figure 9b

Si  $r_s$  est la résistance de la section,  $l$  son inductance,  $i$  l'intensité du courant qui la traverse,  $\varepsilon$  et  $\varepsilon'$  les chutes de tension dues aux contacts lames-balais (lame II avec le balai 1 et lame III avec le même balai ou lame VI avec le balai 2 et lame VII avec le même balai),  $e$  la f.é.m. induite dans chaque section par les flux extérieurs, alors l'intensité  $i$  du courant traversant la section en commutation est donnée par :

$$e = l \frac{di}{dt} + r_s i + \varepsilon - \varepsilon'$$

La commutation s'effectue dans un endroit où le champ magnétique est nul (passage de la ligne neutre), la f.é.m.  $e$  dans la section en commutation est égale à 0. D'où :

$$r_s i = - l \frac{di}{dt} - (\varepsilon - \varepsilon')$$

*Remarque :*

*Les chutes de tension dues aux contacts lames-balais dépendent de la densité de courant :  $\varepsilon$  croît rapidement puis tend vers une asymptote.*

En fin de commutation nous sommes dans la situation suivante :

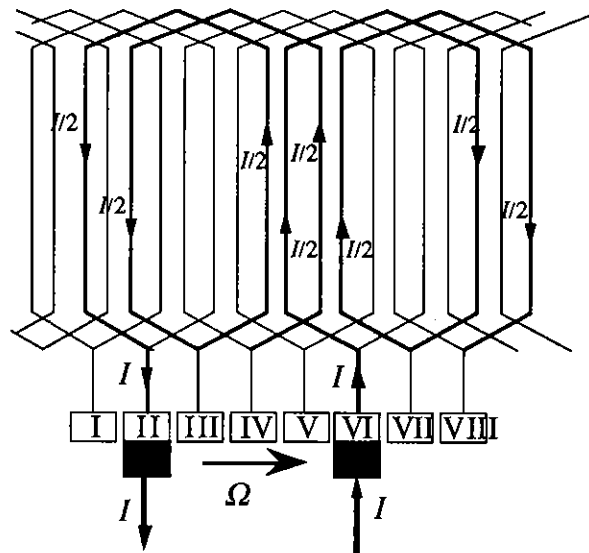


Figure 9c

L'inductance  $l$  s'opposant aux variations de courant rend difficile la commutation.

Si l'on avait  $\varepsilon = \varepsilon'$  on aurait alors :

$$r_s i = - l \frac{di}{dt}$$

et :

$$i = \frac{I}{2} e^{-\frac{r_s t}{l}}$$

Ce qui n'est pas satisfaisant, car à la fin de la commutation, il n'y aurait pas inversion de  $i$ .

La condition  $\varepsilon = \varepsilon'$  n'est donc pas possible.

Les allures possibles de  $i(t)$  sont données par les figures 10a et 10b :

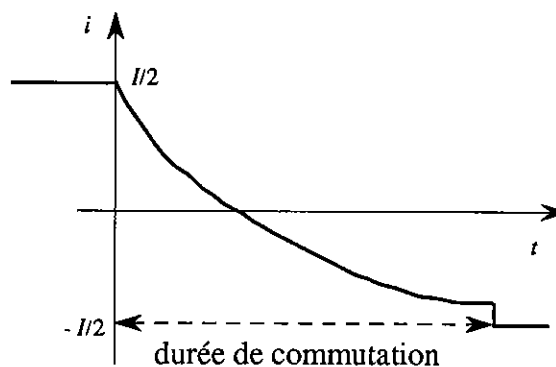


Figure 10a

Dans le cas précédent la commutation est bonne car le courant arrivant dans la lame III est presque nul lorsque la lame III quitte le balai (l'inductance  $l$  est assez faible).

Dans le cas ci-après il n'en est plus de même. L'inductance  $l$  est trop forte. Chaque départ de lame produit un arc qui peut être destructeur pour le collecteur. Il est alors impératif d'éliminer ces arcs électriques.

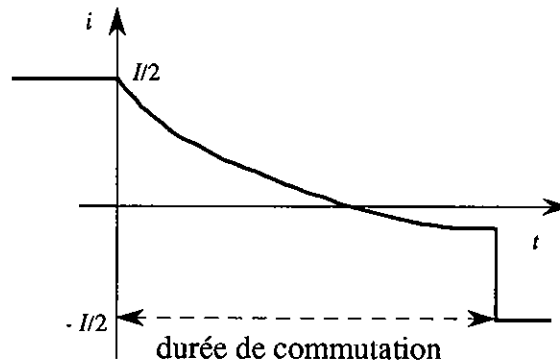


Figure 10b

En réalité la commutation est plus compliquée car les balais ont une largeur supérieure à celle d'une lame ce qui met plusieurs sections en court circuit.

• *Remède :*

On utilise des pôles auxiliaires de commutation situés dans l'axe interpolaire. Leurs enroulements sont traversés par le courant de l'induit et leur sens est tel qu'ils créent une f.é.m. qui accélère l'inversion du courant qui traverse la section en commutation.

Le branchement induit/enroulement de commutation est bon quels que soient le sens de rotation et le mode de fonctionnement (moteur ou génératrice).

#### 2.4 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Deux conducteurs diamétralement opposés (fig.11), traversés par un courant d'intensité  $I$  et placés dans un champ magnétique  $B$  sont soumis à un ensemble de deux forces de Laplace formant un couple. Il en est de même pour tous les ensembles de conducteurs diamétralement opposés. La somme de tous les moments de ces couples de forces constitue le moment du couple électromagnétique ( $T_{em}$ ).

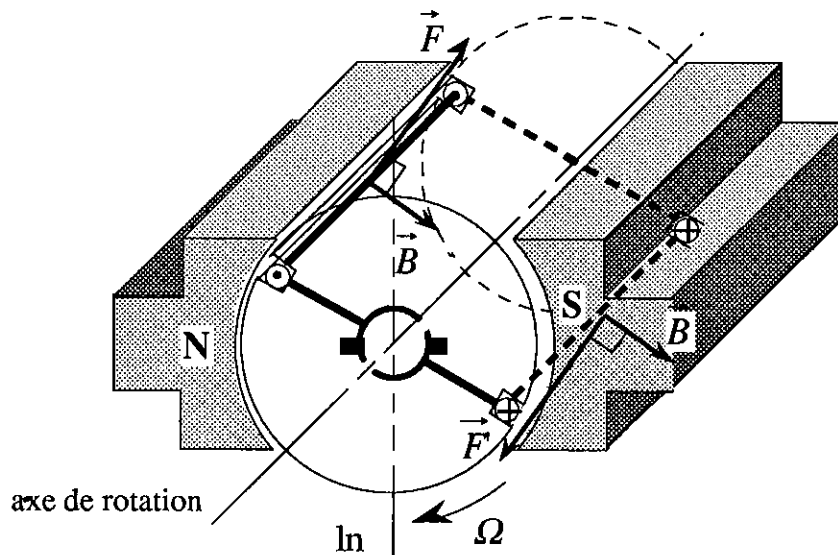


Figure 11

La puissance électromagnétique reçue par la machine est :

$$P_{em} = EI$$

Cette puissance est aussi la puissance intégralement développée par le couple électromagnétique  $T_{em}$  tournant à la vitesse angulaire  $\Omega$  (d'après le principe de la conservation de l'énergie).

Donc : 
$$T_{em} \cdot \Omega = EI$$

Or  $E = Nn\Phi$  et  $\Omega = 2\pi n$ , d'où :

$$T_{em} = \frac{N}{2\pi} \Phi I = K\Phi I$$

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

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

### 3. MOTEUR A EXCITATION INDEPENDANTE (fig.12)

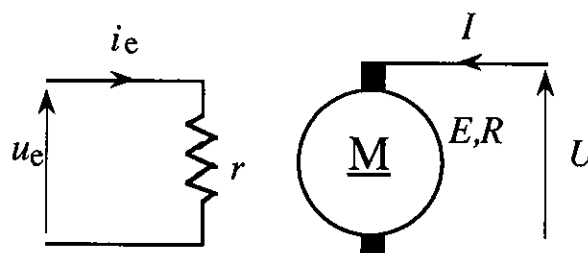


Figure 12

### 3.1 FONCTIONNEMENT SOUS TENSION D'ALIMENTATION CONSTANTE ET COURANT D'EXCITATION CONSTANT

• *Caractéristique  $n(I)$*

Nous avons :  $U = E + RI$

et :  $E = Nn\Phi$

D'où :

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi}$$

A vide  $RI_0$  est négligeable devant  $U$ .

Donc :

$$n \approx \frac{U}{N\Phi} = n_0$$

En fonctionnement normal :

$$n = n_0 - \frac{RI}{N\Phi}$$

La caractéristique de vitesse  $n(I)$  est une droite de faible pente car le coefficient  $R/N\Phi$  est généralement très petit (fig.13).

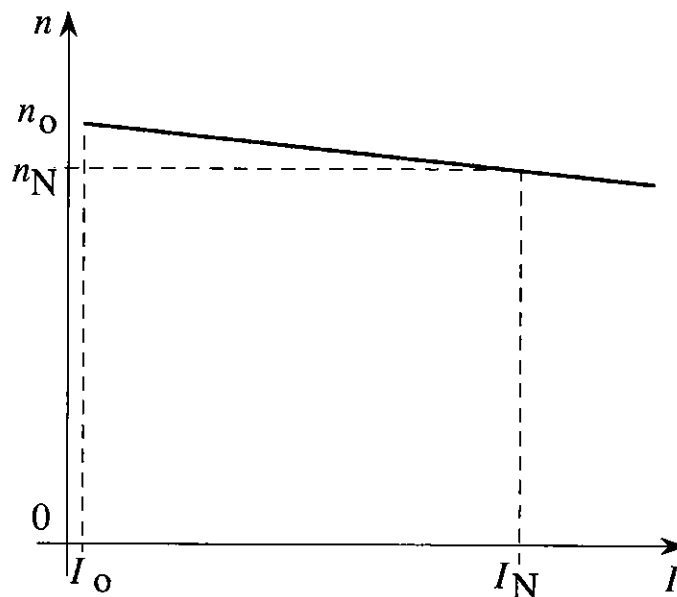


Figure 13

- *Caractéristique  $T_{em}(n)$ .*

Nous avons :

$$n = n_0 - \frac{RI}{N\Phi} \quad \text{et} \quad I = 2\pi \frac{T_{em}}{N\Phi}$$

D'où :

$$T_{em} = (n_0 - n) \frac{N\Phi}{2\pi R}$$

$T_{em}(n)$  est une droite pratiquement verticale (fig.14).

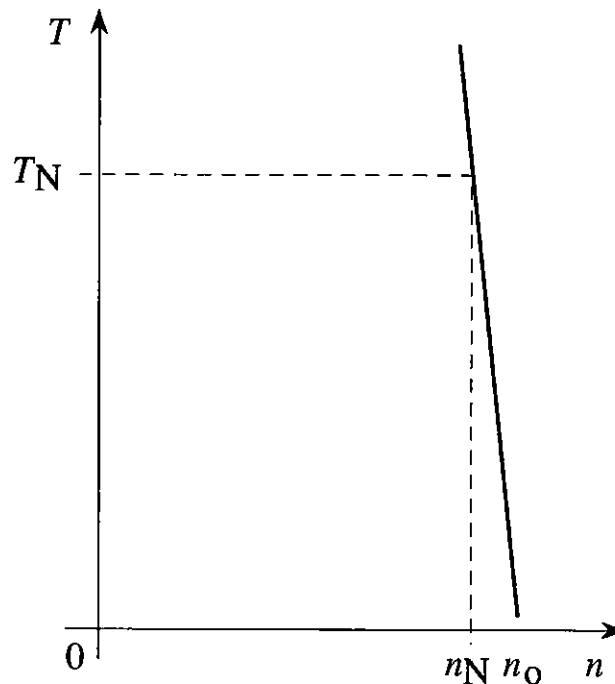


Figure 14

- *Démarrage*

Le moteur ne peut commencer à tourner que si le couple utile au démarrage  $T_{ud}$  est supérieur au couple résistant  $T_r$ . Les pertes étant très faibles à l'arrêt, le couple utile au démarrage est sensiblement égal au couple électromagnétique.

Dans ces conditions :  $T_{ud} \approx T_{emd} = K\Phi I_d > T_r$ ,  $I_d$  étant l'intensité du courant dans l'induit au moment du démarrage.

La condition de démarrage peut alors s'écrire :

$$I_D = \frac{T_r}{K\Phi}$$

### 3.2 FONCTIONNEMENT SOUS TENSION D'INDUIT REGLABLE

#### • Vitesse

L'expression de la vitesse est donnée par la relation :

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi}$$

Dans le cas d'un moteur dont la chute ohmique de tension est négligeable devant la tension d'alimentation, l'expression précédente s'écrit :

$$n \approx \frac{U}{N\Phi}$$

A flux constant, vitesse et tension d'alimentation d'induit sont des grandeurs proportionnelles.

#### • Exemple d'application

Le moment du couple utile  $T_u$  est égal à la différence entre le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$  et le moment du couple  $T_p$  des pertes :

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

Souvent, on a:  $T_p \ll T_{em}$ . Dans ces conditions :

$$T_u \approx T_{em}$$

Les droites représentatives de la caractéristique  $T_u(\Omega)$  pour différentes valeurs de la tension d'induit, sont parallèles et quasiment verticales (fig.15).

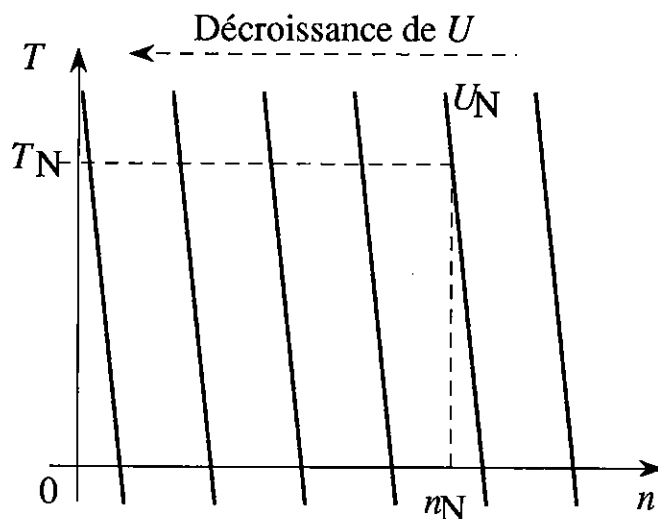


Figure 15



La figure 16 illustre le fonctionnement d'un moteur à excitation séparée entraînant une charge mécanique exerçant un couple de moment constant quelle que soit la vitesse. La vitesse peut être réglée simplement en agissant sur la tension d'induit. Pour une valeur particulière de cette tension ( $U = U_0$ ), la charge peut être maintenue immobile (c'est un type de fonctionnement que l'on trouve avec les engins de levages).

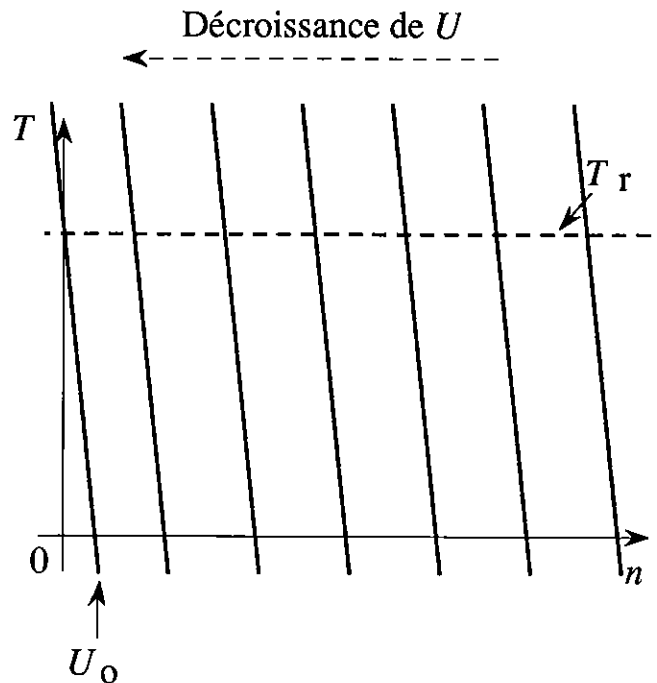


Figure 16

#### 4. BILAN ENERGETIQUE

- *Puissance absorbée*

C'est une puissance purement électrique qui dans le cas d'une machine à électroaimant est égale à :

$$P_a = UI + u_e i_e$$

- *Pertes*

- Pertes par effet joule dans l'induit :

$$P_{ji} = RI^2$$

- Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$P_{je} = r i_e^2 = u_e i_e$$

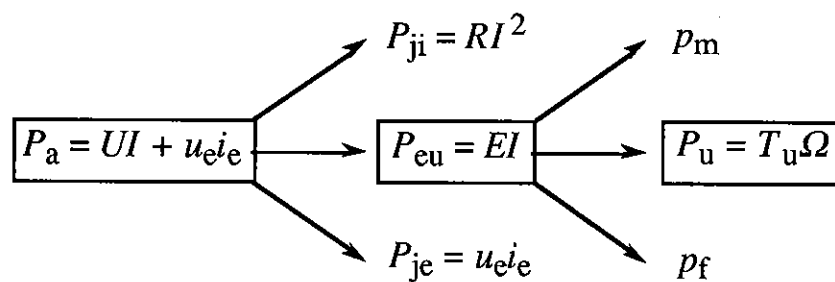
- Pertes mécaniques : elles sont dues aux frottements ; elles varient avec la fréquence.

- Pertes magnétiques : ce sont les pertes dans le fer ; elles sont dues aux courants de Foucault et au phénomène d'hystérésis. Elles sont surtout localisées au rotor (qui tourne par rapport au champ résultant dans l'entrefer). Elles dépendent du champ magnétique et de la fréquence de rotation.

• *Puissance utile*

C'est la puissance mécanique  $P_u$  disponible sur l'arbre du moteur.

Soit en résumé :



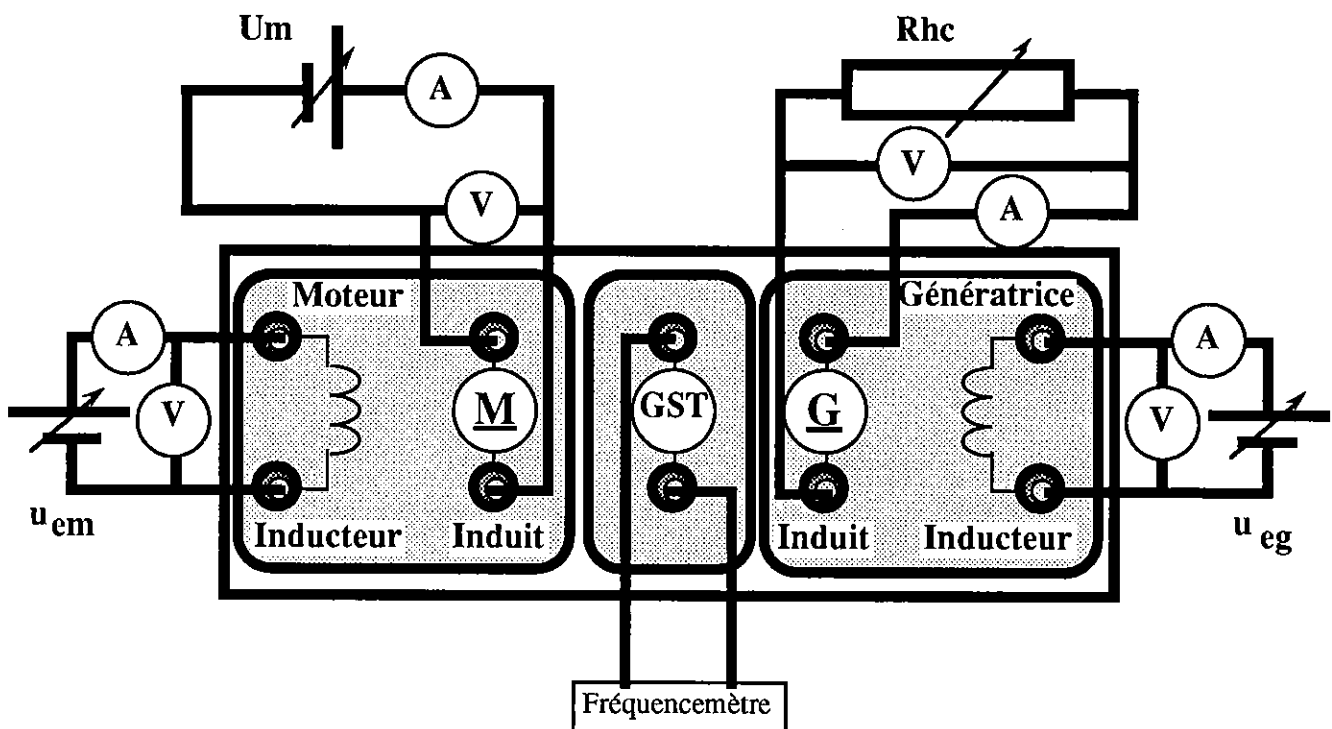
• *Rendement*

Il est donné par la relation :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{UI + u_e i_e}$$

# TRAVAUX PRATIQUES

## 1° MONTAGE COMPLET



Le moteur est chargé par une génératrice qui fournit de l'énergie électrique à un rhéostat de charge

### **Précautions :**

Le moteur est alimenté par une source de tension réglable. Le démarrage doit s'effectuer sous tension réduite ou sous tension nominale avec un rhéostat de démarrage après avoir alimenté l'inducteur pour que le flux sous un pôle soit maximal.

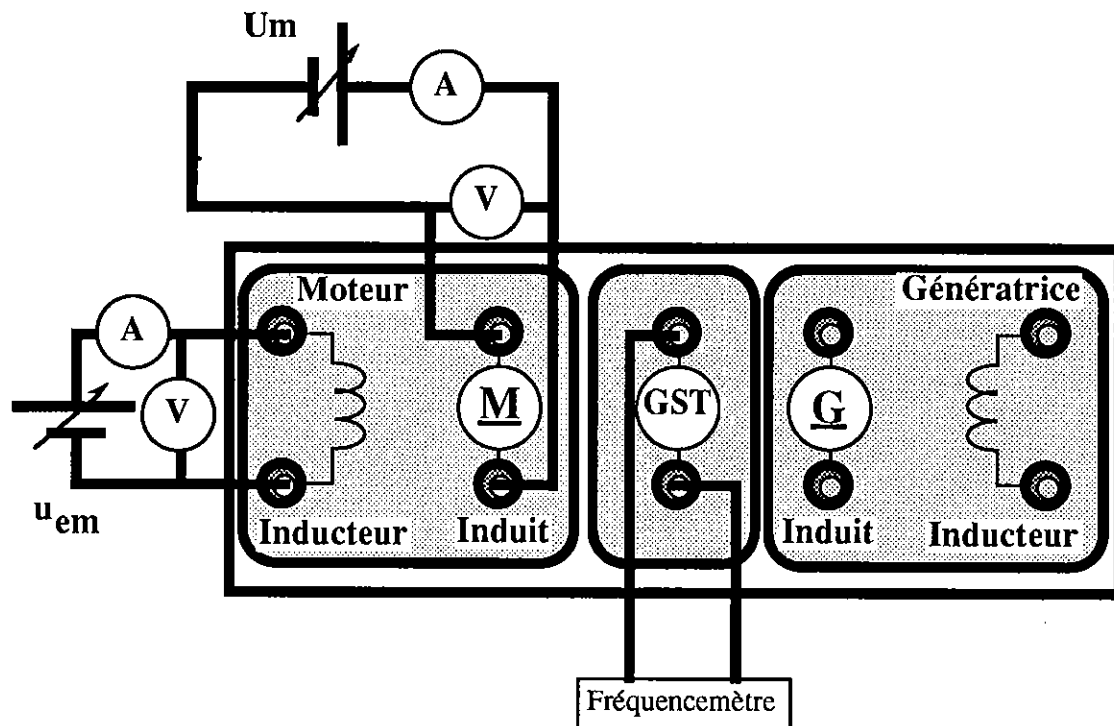
La survitesse admise est de 1,5 fois la vitesse nominale.

Ne jamais débrancher l'excitation du moteur lorsque l'induit est sous tension !

## 2° EXPERIMENTATION

### II.1. CARACTERISTIQUE DE REGLAGE DE VITESSE A VIDE : $n(i_e)$

Réaliser le montage suivant en désaccouplant la génératrice du moteur :



Maintenir la tension d'alimentation  $U$  de l'induit du moteur constante (à sa valeur nominale par exemple). Régler la tension d'alimentation  $u_e$  de l'excitation du moteur à une valeur permettant l'obtention d'une vitesse  $n = 1,5n_N$ . Diminuer progressivement  $u_e$  de l'excitation du moteur. Pour différentes valeurs de l'intensité  $i_e$  du courant d'excitation, relever la fréquence de rotation  $n$ .

Tracer le graphe représentant  $n(i_e)$ .

Conclure.

*Remarque :*

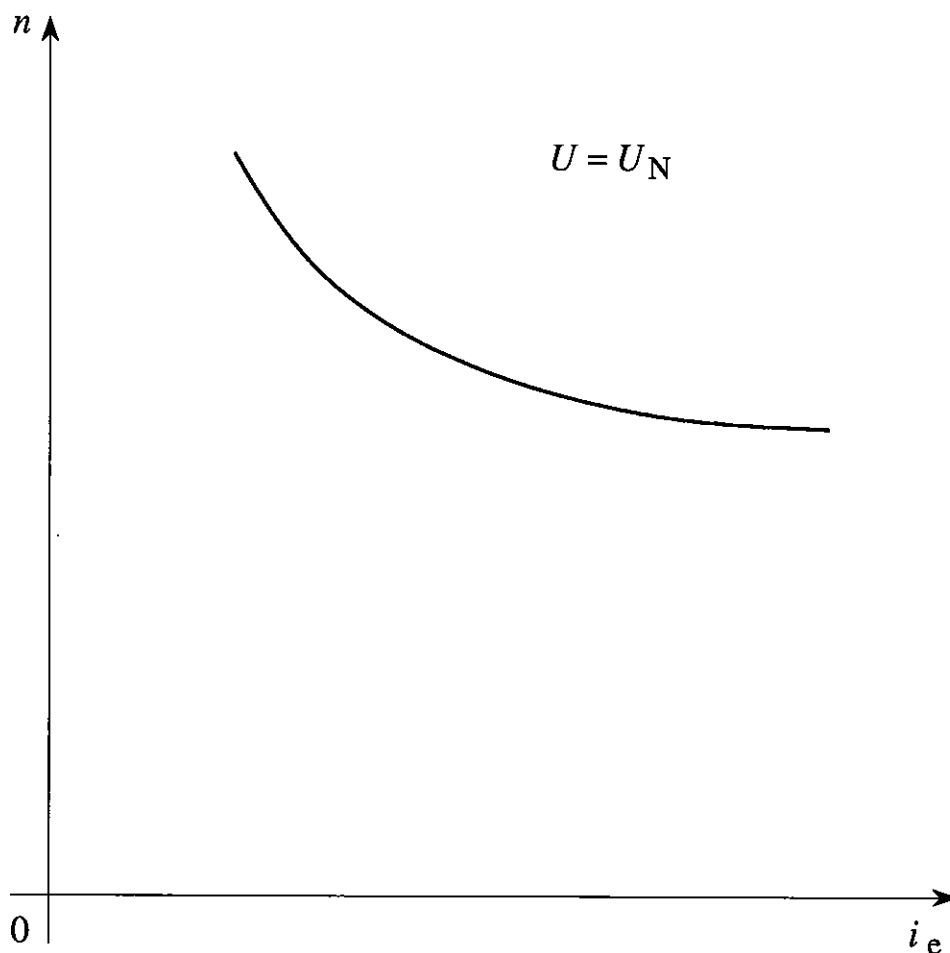
*L'information vitesse étant obtenue à partir d'une génératrice synchrone à 12 paires de pôles, la correspondance "vitesse-fréquence" est donnée par la*

relation  $n = f/12$  avec  $n$  en tr/s ou par la relation  $n = 5.f$  avec  $n$  en tr/min).

Compte-rendu :

La tension d'alimentation du moteur est maintenue constante (à  $U = U_N = 24V$ ).

En faisant varier progressivement la tension d'alimentation de l'excitation du moteur, on relève sa fréquence de rotation pour différentes valeurs de l'intensité  $i_e$  du courant d'excitation.



La fréquence de rotation d'un moteur à courant continu à excitation indépendante est donnée par la relation :

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi}$$

$U$  : tension d'alimentation ;  $I$  : intensité du courant dans l'induit ;

$R$  : résistance de l'induit ;  $N$  : nombre de conducteurs actifs ;  $\Phi$  : flux sous un pôle.

A vide,  $RI_v \ll U$ , donc :

$$n \approx \frac{U}{N\Phi}$$

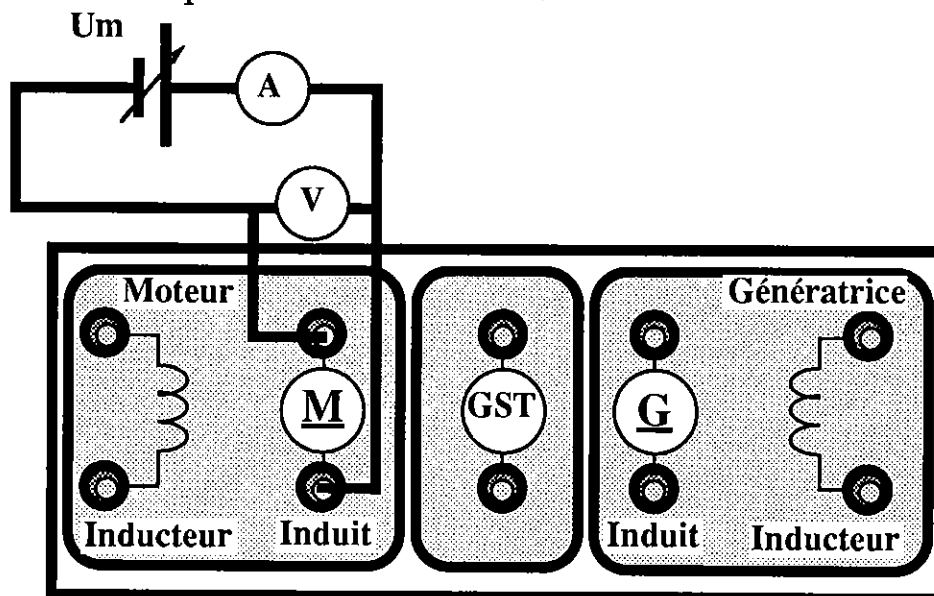
Sous tension constante, le flux reste alors la seule grandeur variable.

Sous une faible excitation, le flux est proportionnel à l'intensité  $i_e$  du courant d'excitation : la portion de courbe correspondante est alors un arc d'hyperbole. Du fait de la saturation magnétique,  $\Phi$  et  $i_e$  ne sont plus proportionnels lorsque l'intensité  $i_e$  devient plus importante : la courbe a alors une allure hyperbolique.

## IL2. DETERMINATION DES PERTES MECANIQUES ET DES PERTES DE FER DU MOTEUR

\* Mesure de la résistance de l'induit.

Réaliser le montage voltampèremétrique en utilisant une alimentation pouvant délivrer 5 A.



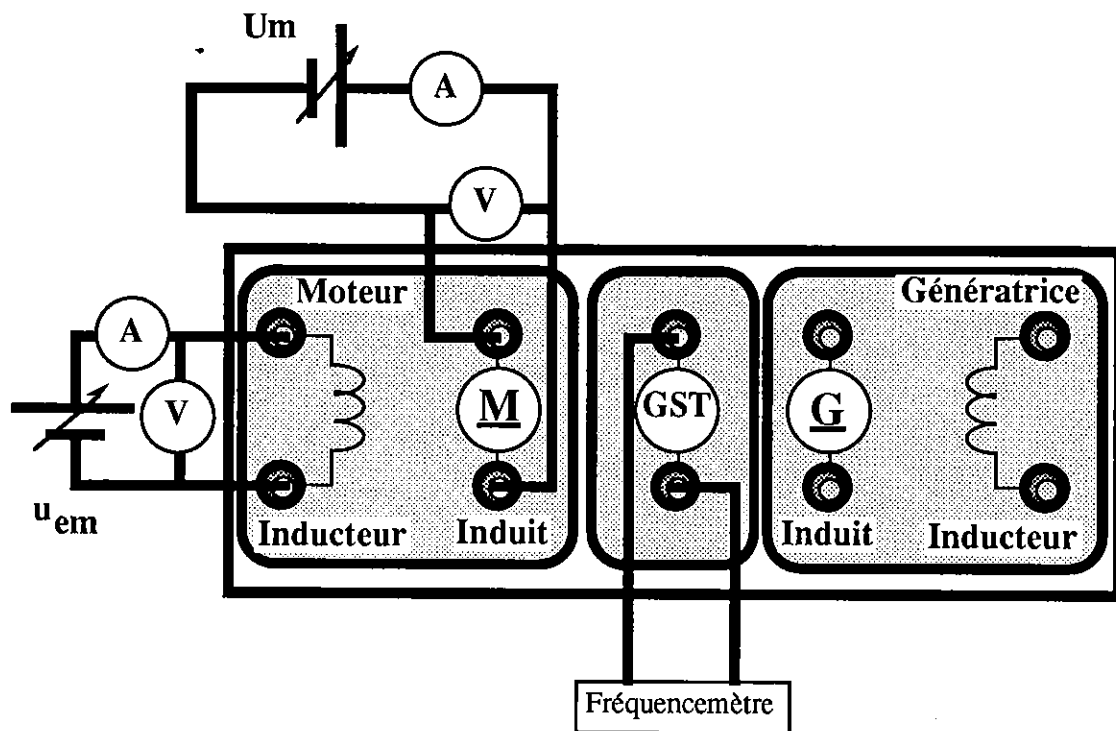
Pour quelques positions du rotor, relever la tension aux bornes de l'induit lorsqu'il est traversé par un courant d'intensité 5 A (le rotor ne tourne pas car le circuit de l'inducteur est ouvert et le champ rémanent de la machine est faible).

On obtient une résistance moyenne de l'ordre de l'ohm.

On pourra tenir compte de la différence entre une mesure de résistance à chaud (après que le moteur ait "travaillé") et une mesure de résistance à froid en appliquant le coefficient 1,25 :

$$R_{\text{chaud}} = 1,25R_{\text{froid}}$$

\* Réaliser le montage suivant :



Désaccoupler la génératrice du moteur.

La vitesse du moteur sera maintenue constante et égale à  $n_N = 3100$  tr/min durant tout l'essai.

En procédant par tension décroissante d'alimentation  $U$  de l'induit, relever, pour quelques valeurs de  $U$ , l'intensité  $I_0$  qui le traverse.

Calculer, pour ces valeurs de tension, les pertes par effet Joule dans l'induit, la f.é.m.  $E_0$  de la machine. En déduire la somme des pertes de fer  $p_f$  et des pertes mécaniques  $p_m$  à la vitesse  $n = n_N$ .

Tracer le graphe  $[p_f + p_m](E^2)$  et en déduire les pertes mécaniques  $p_m$  à  $n = n_N$ .

*Compte-rendu :*

La puissance absorbée par l'induit du moteur est égale à  $UI$ .

C'est aussi :  $p_f + p_m + RI_0^2$

Or :  $U = E_0 + RI_0$

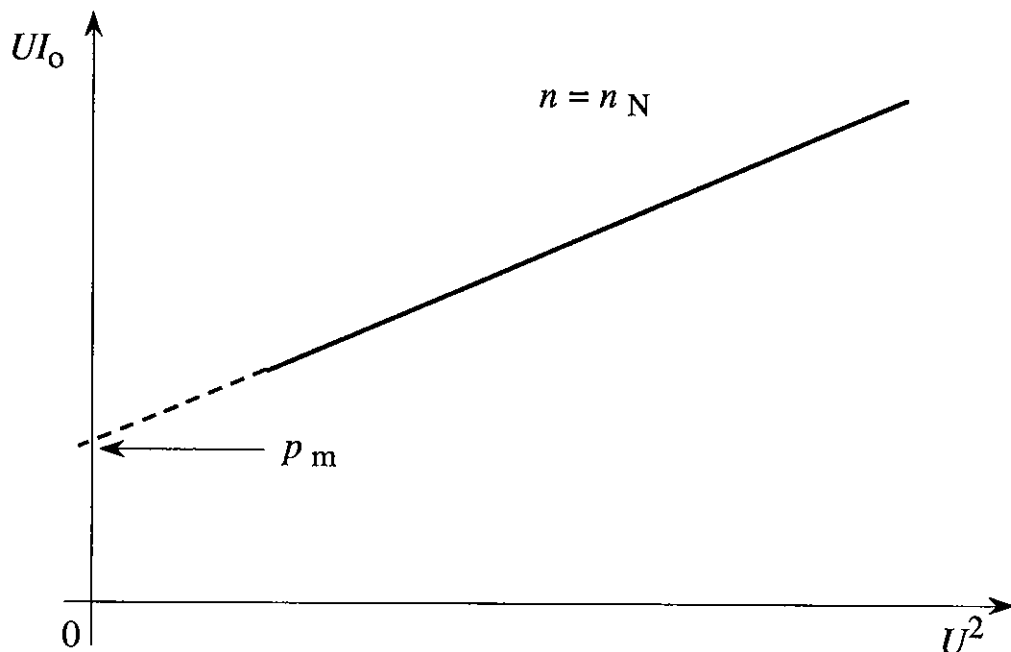
Donc :

$$p_f + p_m = E_0 I_0$$

Pour les faibles valeurs de  $E_0$ , c'est-à-dire pour les faibles valeurs de flux, la somme  $p_f + p_m$  tend vers  $p_m$ .

Les pertes de fer étant proportionnelles au carré du flux, pour séparer  $p_m$  de  $p_f$  il faut donc extrapoler la courbe  $[p_f + p_m](E_0^2)$  vers les faibles valeurs de  $E_0$ . Cette courbe étant une droite, l'extrapolation est aisée.

*Remarque :* L'intensité  $I_0$  est faible, la résistance  $R$  également. Il est possible de confondre  $U$  avec  $E_0$  et le produit  $UI_0$  avec  $p_f + p_m$ .





### II.3. ETUDE DU MOTEUR SOUS TENSION D'ALIMENTATION CONSTANTE

\* Réaliser le montage complet en utilisant :

- des alimentations pouvant délivrer des courants d'intensité 5 A (minimum) sous 24 V pour l'induit du moteur et d'intensité 1 A sous 24 V pour les circuits de l'inducteur ;
- un rhéostat de charge 23  $\Omega$ , 7 A par exemple ;
- un fréquencemètre ou un tachymètre pour la mesure de la vitesse du moteur.

\* Effectuer les différents réglages permettant d'obtenir les valeurs nominales de fonctionnement :  $U_N$ ,  $I_N$  et  $n_N$ .  
Relever l'intensité du courant d'excitation correspondant à ce fonctionnement. Cette valeur sera maintenue constante dans la suite de la manipulation.

*Compte-rendu :*

Alimenter l'inducteur de la génératrice sous une tension de 24 V. En agissant sur le rhéostat de charge et sur la tension d'alimentation de l'inducteur du moteur, se placer au point nominal de fonctionnement, soit pour le moteur choisi :

$$U_N = 24 \text{ V} ; I_N = 5 \text{ A} ; n_N = 3100 \text{ tr/min} ;$$

On obtient  $i_e \approx 0,6 \text{ A}$ .

\* Pour plusieurs valeurs de l'intensité  $I$  du courant traversant l'induit du moteur, relever  $I$  et la vitesse  $n$  du moteur.

\* Les machines étant chaudes, déterminer par la méthode voltampèremétrique, leurs résistances de l'induit ( $R$ ) et de l'inducteur ( $r$ ) et vérifier que le coefficient de 1,25 choisi dans le 2.2. est justifié.

\* Pour chaque valeur de l'intensité  $I$ , calculer :

- la puissance absorbée  $P_a$  par le moteur ;

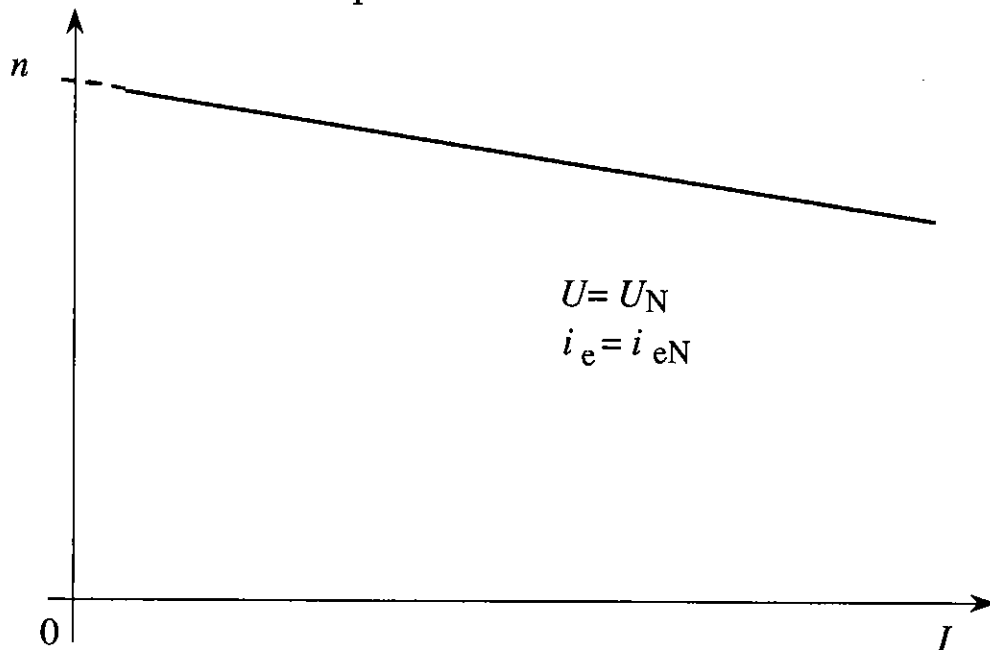
- les pertes par effet Joule  $P_J$  dans l'induit et dans l'inducteur ;
- la puissance disponible  $P_u$  sur l'arbre du moteur en supposant la somme des pertes mécaniques et de fer constantes ;
- le moment  $T_{em}$  du couple électromagnétique ;
- le moment  $T_u$  du couple utile.

\* Tracer :

- la caractéristique électromécanique de vitesse :  $n(I)$ ,
- les caractéristiques électromécaniques de couple :  $T_{em}(I)$  et  $T_u(I)$ ,
- les caractéristiques mécaniques de couple :  $T_{em}(n)$  et  $T_u(n)$ .

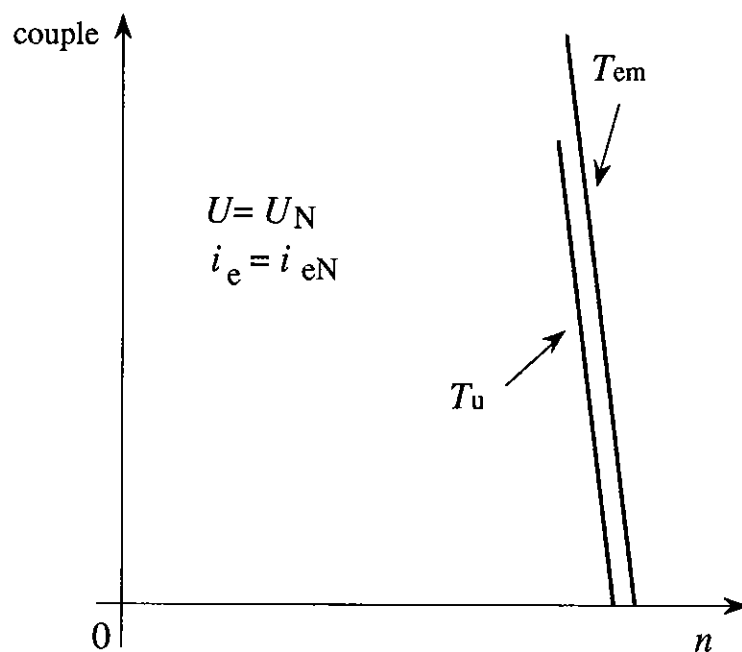
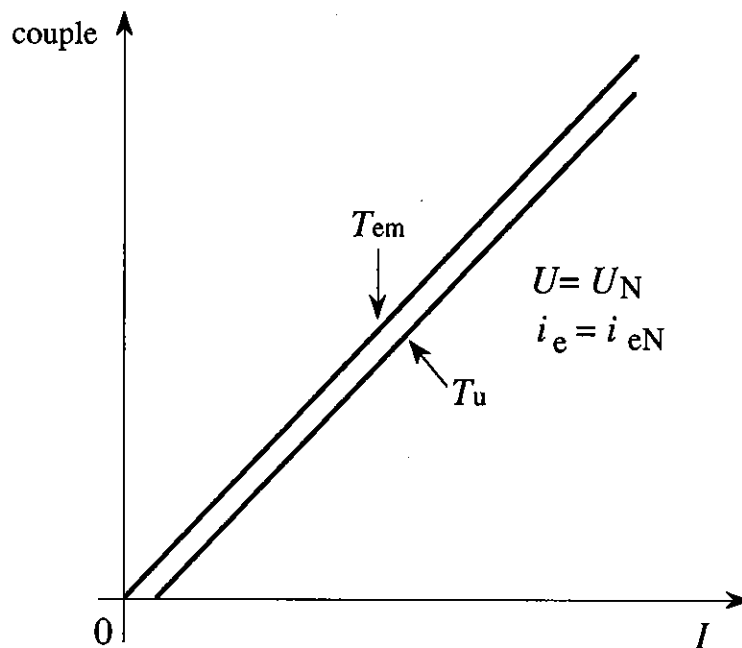
Compte-rendu :

La caractéristique électromécanique de vitesse :  $n(I)$  se trace directement à partir des relevés.



Le tracé des autres caractéristiques nécessite des calculs préparatoires (avec un capteur de couple, il serait possible de relever le moment du couple pour les

différentes charges choisies et de tracer directement  $T_u(I)$  et  $T_u(n)$ .



A partir des valeurs de l'intensité du courant  $I$ , on calcule  $RI$ , puis  $RI^2$ , on en déduit la f.é.m.  $E$  puis la puissance électromagnétique  $EI$ . Avec la valeur de la vitesse, on en déduit le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$ .

Associés aux résultats de la méthode des pertes séparées, il est possible de calculer la puissance utile :

$$P_u = EI - p_f - p_m$$

puis d'en déduire le moment du couple utile :

$$T_u = EI / 2\pi n$$

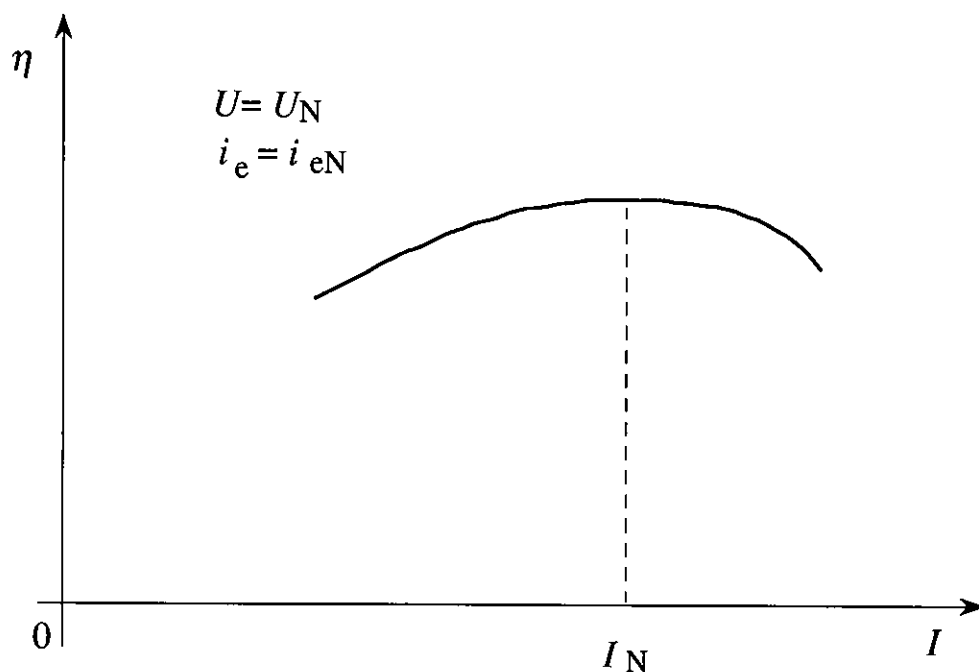
Il est alors possible de tracer l'ensemble des courbes demandées.

\* Pour chaque valeur de  $I$ , calculer le rendement  $\eta$  et tracer la courbe  $\eta(I)$ .

Quelle est la valeur du rendement pour  $I = I_N$  ?

*Compte-rendu :*

Pour chaque valeur de  $I$ , le rendement  $\eta$  se calcule en faisant le rapport  $P_u/P_a$ .



En plaçant sur le graphe  $I = I_N$ , on détermine le rendement au point nominal.

Le rendement de la machine est alors maximal.

\* En plaçant sur les courbes précédentes, le point nominal de fonctionnement comparer les résultats obtenus aux valeurs indiquées sur la plaque signalétique.

*Compte rendu :*

En plaçant sur les courbes précédentes, le point nominal de fonctionnement on retrouve les valeurs indiquées sur la plaque signalétique.

*Remarque*

*Lorsque le courant appelé est intense, la réaction magnétique d'induit n'est plus négligeable : la machine ne fonctionne plus en régime linéaire. La zone utile de fonctionnement d'un moteur à excitation indépendante correspond à la zone de fonctionnement quasi-linéaire. On constate que dans la zone utile de fonctionnement la vitesse d'un moteur à excitation indépendante varie peu avec la charge.*

#### II.4. MOTEUR ALIMENTÉ SOUS TENSION CONSTANTE AVEC RHEOSTAT EN SÉRIE AVEC L'INDUIT

Placer en série avec l'induit un rhéostat de résistance  $R_h$  du même ordre de grandeur que celle  $R$  de l'induit. Effectuer les essais avec  $i_e = i_{eN}$  permettant le tracé des caractéristiques :

- \*  $n(I)$ ,
- \*  $T_u(n)$ ,
- \*  $T_u(I)$ ,
- \*  $\eta(I)$ .

Comparer ces caractéristiques aux précédentes. Conclure.

*Compte-rendu*

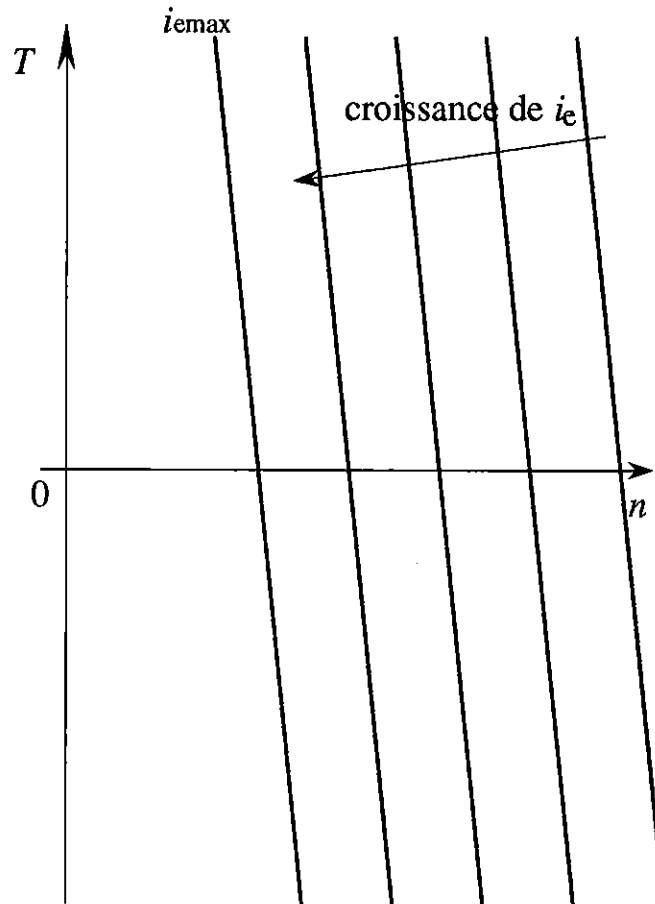
On place en série avec l'induit un rhéostat de résistance  $R_h$  du même ordre de grandeur que celle  $R$  de l'induit. L'intensité  $i$  est maintenue à la valeur  $i_{eN}$ .

L'addition d'une résistance dans le circuit de l'induit permet d'étendre vers le bas la plage des vitesses qu'on

peut obtenir en charge. Cela se fait au détriment du rendement : c'est une solution qui ne peut convenir qu'aux petits moteurs.

## II.5. FREINAGE ELECTRIQUE

\* Expliquer le principe du freinage par récupération à partir des courbes  $n(I)$ .



*Compte-rendu :*

A tension d'alimentation  $U$  et courant d'excitation  $i_e$  donnés, quand le couple résistant diminue, s'annule puis s'inverse, la f.é.m.  $E$  croît légèrement et avec elle la vitesse  $n$  :

$$n = \frac{E}{N\Phi}$$

Quand le couple résistant est positif, le courant absorbé  $I$  est positif :

$$E = U - RI$$

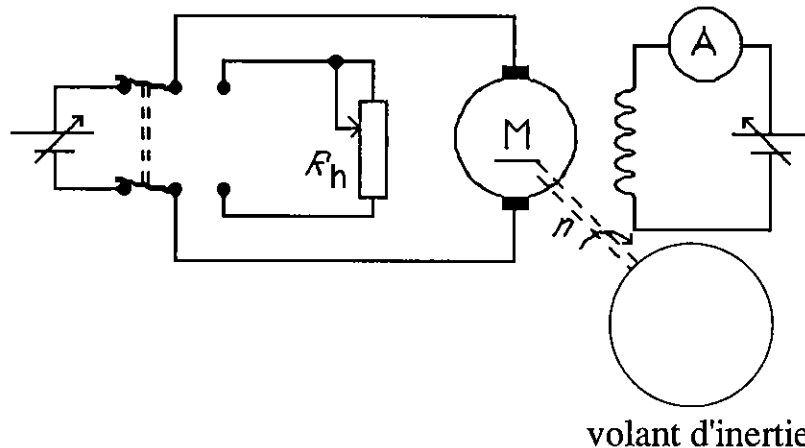
Lorsque le couple est nul,  $I \approx 0$  et  $E = U$ .

Lorsque le couple est négatif,  $I$  est négatif, la machine fonctionne en génératrice renvoyant ainsi du courant au réseau.

Le freinage en récupération s'effectue à vitesse sensiblement constante : si on ne modifie pas  $i_e$ , la vitesse augmente peu avec le couple de freinage.

Si on veut ralentir, il faut augmenter  $i_e$ , en même temps on augmente le couple de freinage (mais on ne peut dépasser la valeur maximale de  $i_e$ ).

\* Un freinage rhéostatique est possible. Pour cela on réalise le montage de la figure suivante :



Associer au moteur un volant d'inertie et réaliser l'essai proposé.

*Compte-rendu :*

Lorsque l'on commute l'interrupteur, la machine fonctionne en génératrice débitant dans un rhéostat  $Rh$  (on utilise un rhéostat de démarrage). Le couple de freinage est pratiquement proportionnel au courant  $I$  débité par la génératrice (c'est le couple électromagnétique qui est rigoureusement proportionnel à  $I$ ).

On commence le freinage avec une forte valeur de  $Rh$  puis on diminue progressivement  $Rh$  ; enfin aux basses vitesses, l'induit est court-circuité.

## II.6. ETUDE DU MOTEUR SOUS TENSION D'ALIMENTATION REGLABLE

L'intensité du courant d'excitation du moteur est toujours maintenue à sa valeur nominale.

### a) Étude à vide

Faire varier la tension d'alimentation de l'induit. Relever la vitesse  $n$  de rotation pour quelques valeurs de la tension  $U$ . Tracer le graphe représentant  $n(U)$ .

*Compte-rendu :*

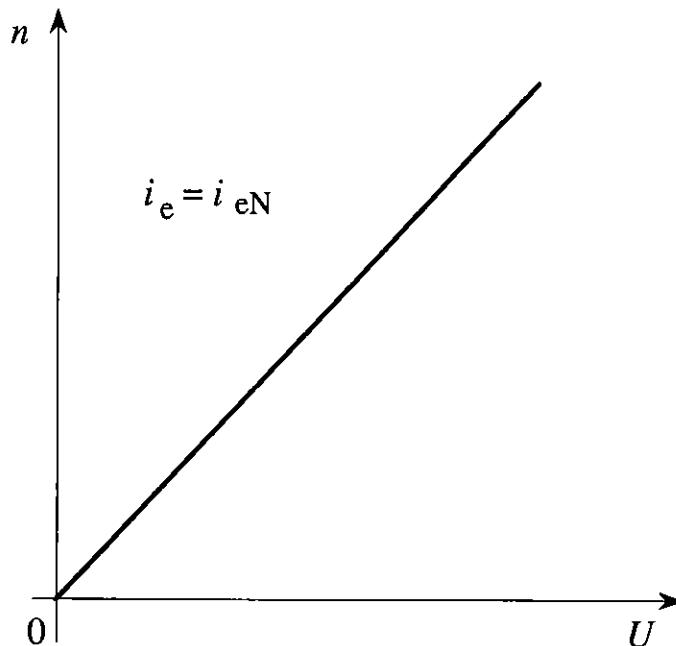
A intensité du courant d'excitation  $i_e$  constante, on a :

$$\Phi = \text{Cste.}$$

A vide, on a  $RI_v \ll U$ , d'où :

$$n \approx \frac{U}{N\Phi}$$

La caractéristique  $n(U)$  obtenue est une droite passant par pratiquement par l'origine : la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation.



C'est un résultat conforme à la relation précédente



## b) Etude en charge

\* Pour plusieurs valeurs de l'intensité  $I$  du courant traversant l'induit du moteur, relever  $I$  et la vitesse  $n$  du moteur lorsque :

$$U = 3U_N/4 \text{ puis } U = U_N/2 \text{ et enfin } U = U_N/4.$$

\* Pour chaque valeur de l'intensité  $I$ , calculer :

- la puissance absorbée  $P_a$  par le moteur ;
- les pertes par effet Joule  $P_J$  dans l'induit et dans l'inducteur ;
- la puissance disponible  $P_u$  sur l'arbre du moteur en se servant également des résultats de la méthode des pertes séparées, les pertes mécaniques étant supposées proportionnelles à la vitesse;
- le moment  $T_{em}$  du couple électromagnétique ;
- le moment  $T_u$  du couple utile.

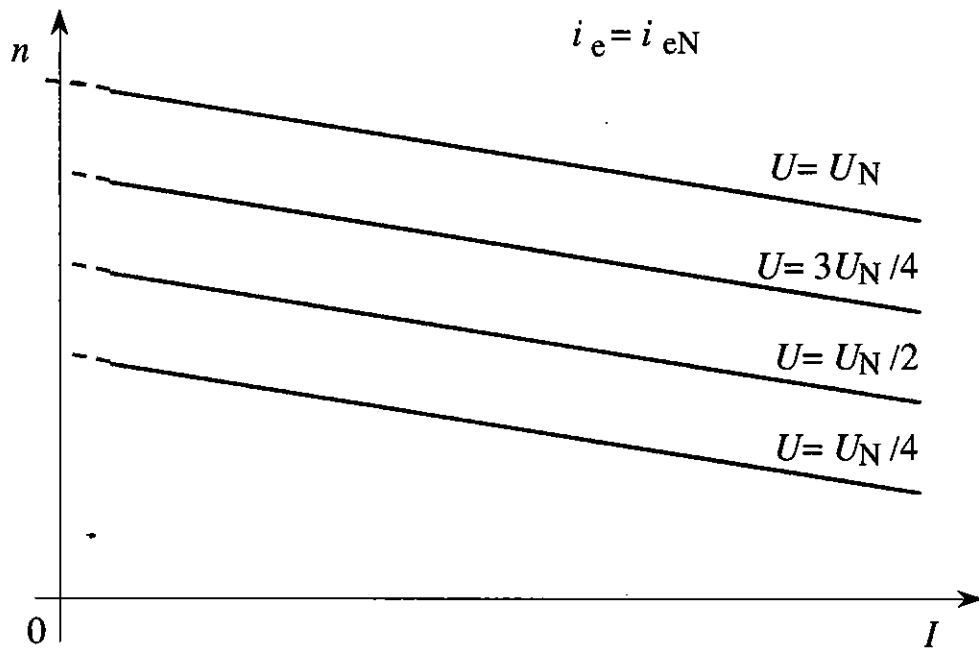
\* Tracer :

- les caractéristiques électromécaniques de vitesse :  $n(I)$ ,
- les caractéristiques électromécaniques de couple :  $T_{em}(I)$  et  $T_u(I)$ ,
- les caractéristiques mécaniques de couple :  $T_{em}(n)$  et  $T_u(n)$ .

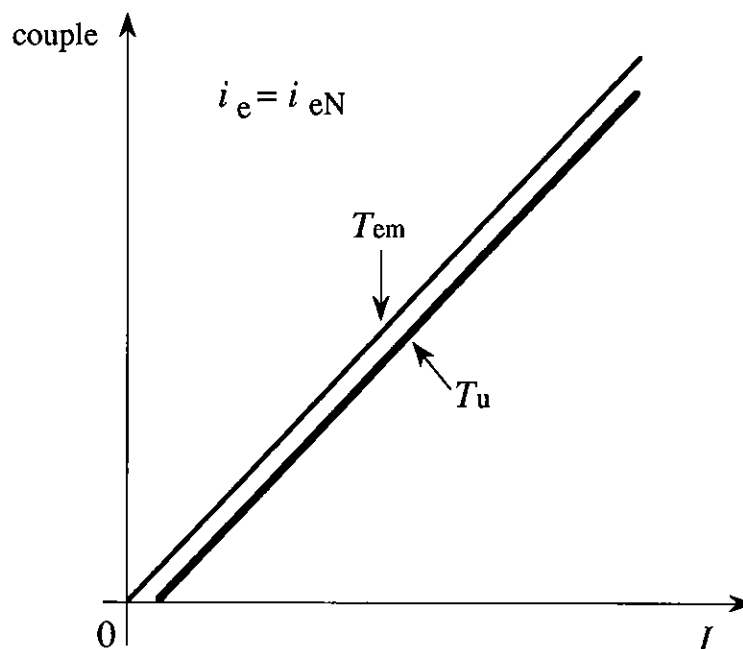
*Compte-rendu :*

La caractéristique électromécanique de vitesse :  $n(I)$  se trace directement à partir des relevés.

Le tracé des autres caractéristiques nécessite des calculs préparatoires (avec un capteur de couple, il serait possible de relever le moment du couple pour les différentes charges choisies et de tracer directement  $T_u(I)$  et  $T_u(n)$ ).



A partir des valeurs de l'intensité du courant  $I$ , on calcule  $RI$ , puis  $RI^2$ , on en déduit la f.é.m.  $E$  puis la puissance électromagnétique  $EI$ . Avec la valeur de la vitesse, on en déduit le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$ .



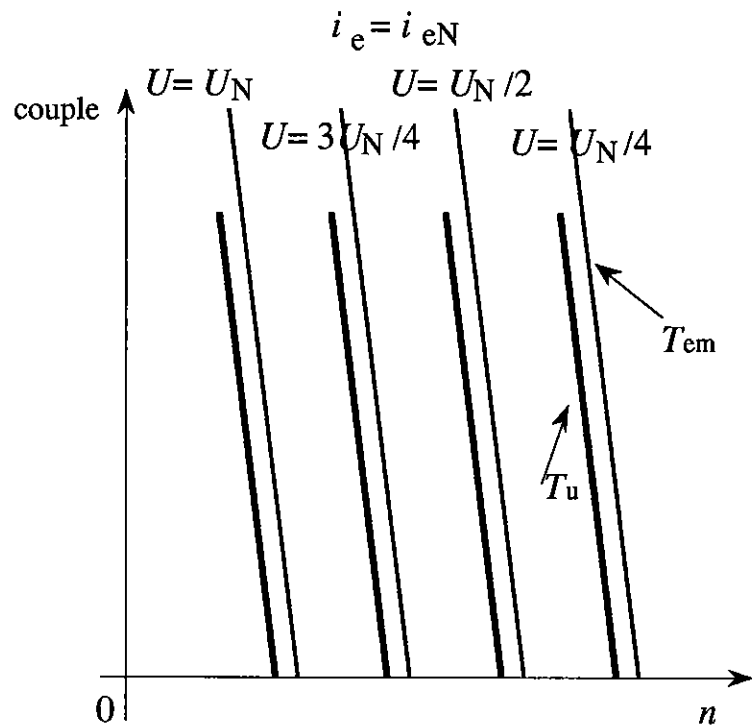
Associés aux résultats de la méthode des pertes séparées, il est possible de calculer la puissance utile :

$$P_u = EI - p_f - p_m$$

puis d'en déduire le moment du couple utile :

$$T_u = EI / 2\pi n$$

Il est alors possible de tracer l'ensemble des courbes demandées.



Les zones utiles de fonctionnement forment un réseau de droites parallèles : faire varier la tension d'alimentation est donc une méthode permettant la variation de la vitesse du moteur.

\* L'intensité  $I$  du courant traversant le moteur est maintenue constante à sa valeur nominale.

Pour quelques valeurs de la tension d'induit  $U$ , relever la vitesse  $n$  du moteur et calculer :

- la puissance absorbée  $P_a$  par le moteur ;
- les pertes par effet Joule  $P_J$  dans l'induit ;
- la puissance disponible  $P_u$  sur l'arbre du moteur en se servant également des résultats de la méthode des pertes séparées, les pertes mécaniques étant supposées proportionnelles à la vitesse;
- le moment  $T_{em}$  du couple électromagnétique ;
- le moment  $T_u$  du couple utile.

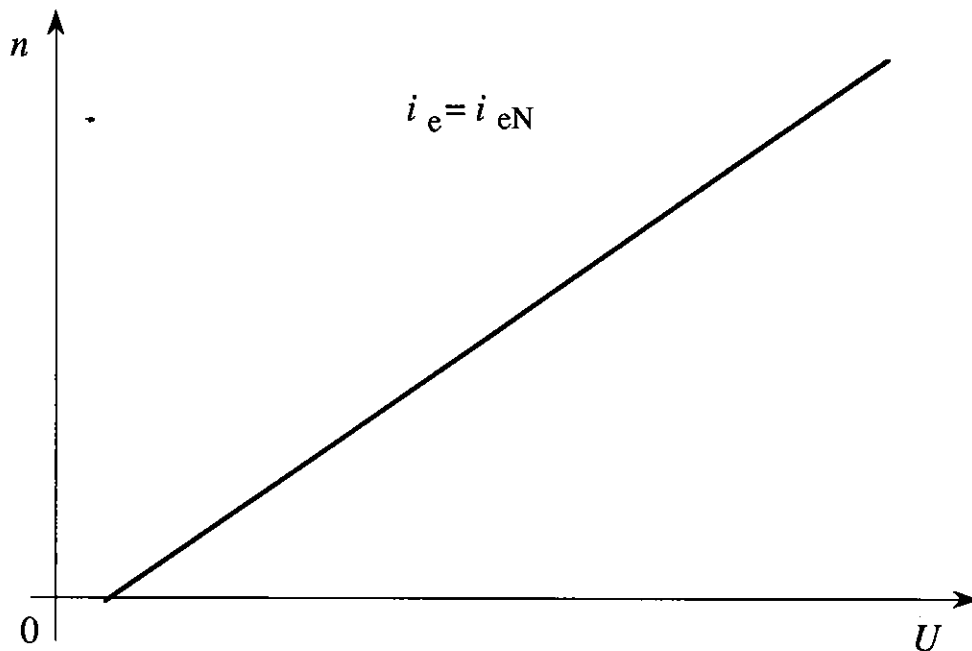
\* Construire les courbes représentatives de :

- $n(U)$ ,
- $T_u(U)$ .

Analyser les courbes obtenues.

Compte-rendu :

La caractéristique électromécanique de vitesse :  $n(U)$  se trace directement à partir des relevés.



A intensité du courant d'excitation  $i_e$  constante, on a :

$$\Phi = \text{Cste.}$$

L'expression de la vitesse est :

$$n = \frac{U - RI}{N\Phi} = \frac{U}{N\Phi} - \frac{RI}{N\Phi}$$

Comme l'intensité  $I$  traversant l'induit est constante on a  $RI = \text{Cste.}$

Soit :

$$n = \frac{aU}{N\Phi} - U_0$$

La caractéristique  $n(U)$  est une droite dont l'intersection avec l'origine donne la tension nécessaire au "décollage" du moteur.

A partir de la valeur de l'intensité du courant  $I$ , on calcule  $RI$ , puis  $RI^2$ , on en déduit la f.é.m.  $E$  puis la

puissance électromagnétique  $EI$ . Avec l'information vitesse, on en déduit le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$ .

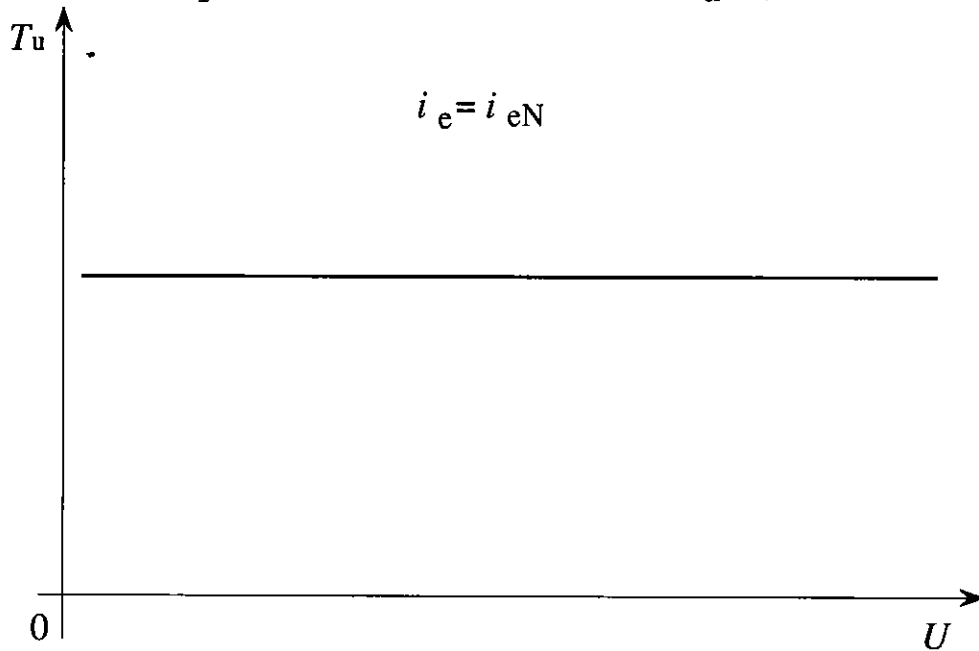
Associés aux résultats de la méthode des pertes séparées, il est possible de calculer la puissance utile :

$$P_u = EI - p_f - p_m$$

puis d'en déduire le moment du couple utile :

$$T_u = EI / 2\pi n$$

Il est alors possible de tracer la courbe  $T_u(U)$  demandé



Le moment du couple est pratiquement constant.

**SOMMAIRE****RAPPEL DE COURS**

1. DESCRIPTION	p. 1
2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	p. 2
2.1 Force électromotrice	p. 3
2.2 Réaction magnétique d'induit	p. 5
2.3 Commutation	p. 7
2.4 Couple électromagnétique	p. 10
3. MOTEUR A EXCITATION INDEPENDANTE	p. 11
3.1 Fonctionnement sous tension d'alimentation constante et courant d'excitation constant	p. 12
3.2 Fonctionnement sous tension d'induit réglable	p. 14
4. BILAN ENERGETIQUE	p. 15

**TRAVAUX PRATIQUES**

1° MONTAGE COMPLET	p. 17
2° EXPERIMENTATION	p. 18
II.1. CARACTERISTIQUE DE REGLAGE DE VITESSE A VIDE	p. 18
II.2. DETERMINATION DES PERTES MECANQUES ET DES PERTES DE FER DU MOTEUR	p. 20
II.3. ETUDE DU MOTEUR SOUS TENSION D'ALIMENTATION CONSTANTE	p. 23
II.4. MOTEUR ALIMENTE SOUS TENSION CONSTANTE AVEC RHEOSTAT EN SERIE AVEC L'INDUIT	p. 27
II.5. FREINAGE ELECTRIQUE	p. 28
II.6. ETUDE DU MOTEUR SOUS TENSION D'ALIMENTATION REGLABLE	p.30