

MACHINES A COURANT CONTINU

1	Principe	1
1.1	Description sommaire	1
2	Machine réelle	1
2.1	Constituants principaux.....	1
2.2	Enroulement de la machine à courant continu	2
2.2.1	Voie d'enroulement.....	2
2.3	Répartition du flux.....	2
2.3.1	Réaction d'induit.....	2
2.3.2	Compensation de la réaction d'induit.....	2
3	F.E.M. et couple électromagnétique	3
3.1	F.E.M.....	3
3.2	Couple électromagnétique	3
3.3	Modèle électrique de l'induit.....	3
3.3.1	En régime établi	3
3.3.2	En régime variable.....	4
3.4	Mode de production du flux.....	4
3.4.1	Moteur à flux fixe	4
3.4.2	Moteur à flux réglable	4
4	Caractéristiques électriques	4
4.1	Caractéristiques à vide.....	4
4.1.1	FEM en fonction de l'excitation.....	4
4.1.2	FEM en fonction de la vitesse.....	4
4.2	Caractéristiques en charge	4
4.2.1	Fonctionnement en générateur U(I).....	4
4.2.2	Moteur à excitation constante.....	5
4.2.2.1	Caractéristiques réelle : $\Omega = F(I)$, $C=F(I)$, $C= F(\Omega)$	5
4.2.2.2	Stabilité.....	5
4.2.3	Moteur à excitation série.....	5
4.2.3.1	Caractéristiques.....	6
4.2.3.2	Propriétés	6
5	Démarrage des moteurs	6
5.1	Conditions	6
5.2	Calcul d'un rhéostat de démarrage	6
6	Variation de vitesse d'une machine à courant continu	7
6.1	Principe.....	8
6.2	Variation de vitesse par action sur le flux	8
6.2.1	Généralités	9
6.2.2	Evolution des caractéristiques (excitation séparée)	9
6.3	Variation de vitesse par action sur la tension	9
6.3.1	Généralités	9
6.3.2	Evolution des caractéristiques (excitation séparée)	9
6.4	Choix d'un moteur à vitesse variable.....	9
6.4.1	Réglage par la tension :valeurs limites	9
6.4.2	Réglage par le flux :valeurs limites	9
6.4.3	Quadrants de fonctionnement du moteur	11
7	Freinage des moteurs à courant continu	11

8	Rendement des machines des moteurs à courant continu	11
8.1	Définition.....	11
8.2	Analyse des pertes.....	11
8.3	Rendement par la méthode des pertes séparées.....	11
8.3.1	Pertes mécaniques.....	11
8.3.2	Pertes cuivre	11
8.3.3	Pertes d'excitation	11
9	Moteur à courant continu en régime transitoire	12
9.1	Equations électromécaniques du moteur	12

MACHINES A COURANT CONTINU

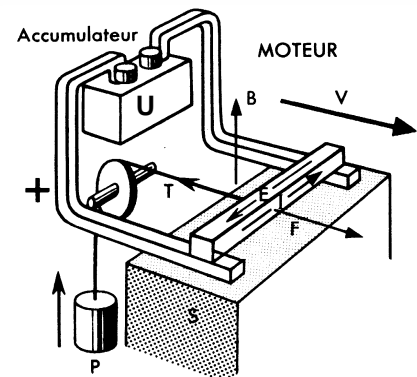
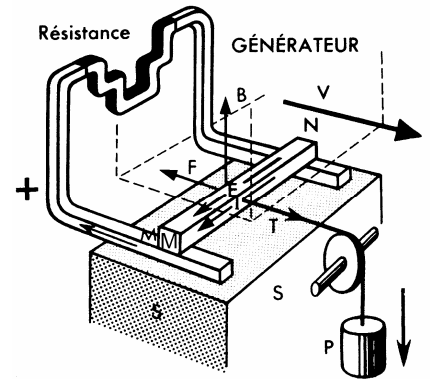
1 PRINCIPE

Un conducteur MN se déplace à la vitesse V dans un champ B (grandeurs orthogonales entre elles).

- Il est le siège d'une FEM $E = B.L.V$,
- produisant un courant $I = E/R$ dans la résistance.

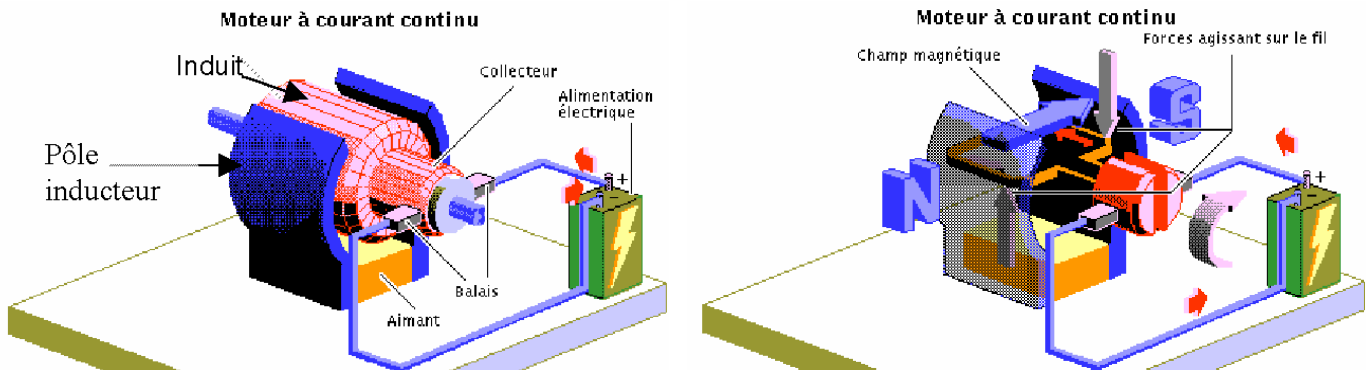
Le conducteur MN parcouru par un courant I est soumis à une force électromagnétique $F = B.I.L$ en sens inverse du mouvement imposé.

- Le conducteur en déplacement est alors le siège d'une FEM $E = B.L.V$ (loi précédente) opposée à celle de la source d'alimentation.
- Le courant $I = (U - E)/R$ (R résistante totale du circuit).
- Le sens du courant est fonction de E par rapport à U . Si $U > E$ l'accumulateur est un générateur et le conducteur un moteur.



1.1 DESCRIPTION SOMMAIRE

Il est très difficile de créer un champ uniforme plat, d'où l'idée de transformer le mouvement linéaire en mouvement circulaire.



2 MACHINE REELLE

2.1 CONSTITUANTS PRINCIPAUX

- 1 : carcasse (matériau ferromagnétique).
- 11: pôles principaux,
- 31: induit,
- 21: pôles de commutation,
- 101: enroulement inducteur,
- 61: collecteur,
- 71: bagues.

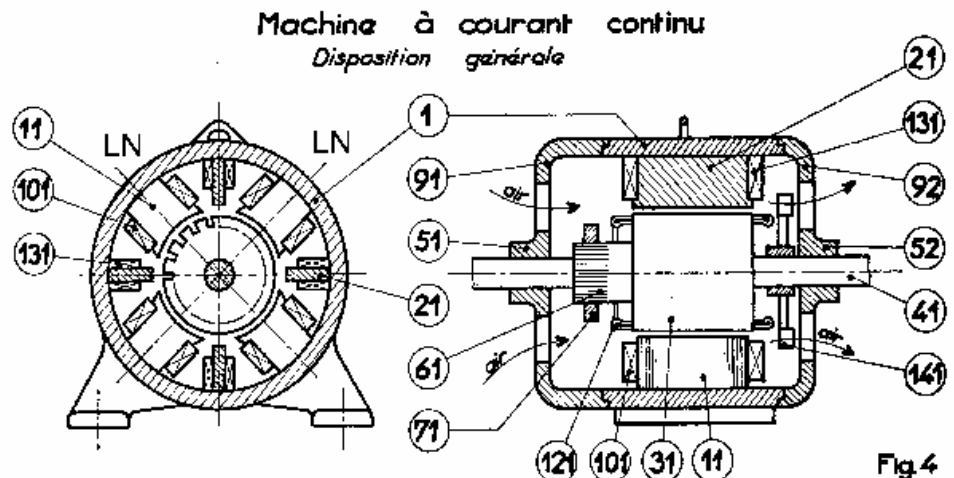


Fig.4

2.2 ENROULEMENT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

L'enroulement de l'induit est fermé sur lui-même.

Les conducteurs sont logés dans des encoches, chaque conducteur est le siège d'une FEM qu'on recueille à l'aide du collecteur (1encoche = une lame de collecteur) (figure 27, 28).

Les FEM sous un pôle ont toutes le même sens (figure 31, 33).

L'enroulement de la machine peut être de type imbriqué (figure 31, 32) ou ondulé (figure (33, 34).

2.2.1 VOIE D'ENROULEMENT

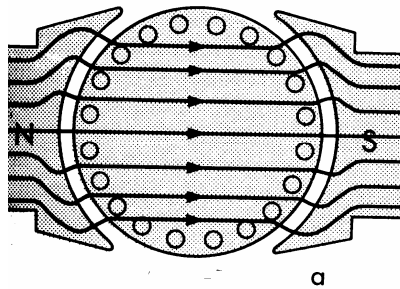
On appelle voie d'enroulement la zone du bobinage dans la quelle les FEM sont toutes dans le même sens. Cette zone est toujours situés sous un même pôle et peut dans certains cas occuper plusieurs pôles consécutifs.

Le nombre de voie d'enroulement est toujours paire. Ont défini :

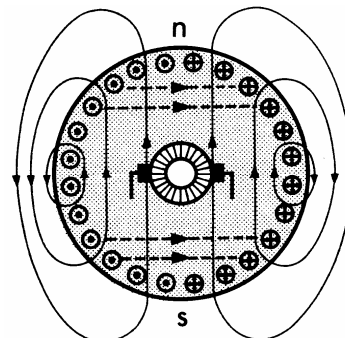
- a : nombre de paires de voies d'enroulement,
- 2a nombre de voies d'enroulement.

(Dessins).

2.3 REPARTITION DU FLUX

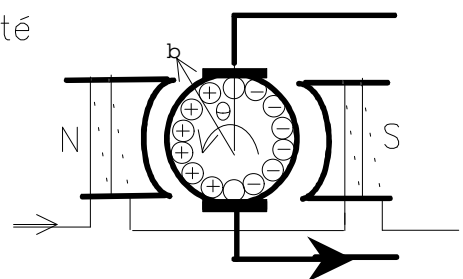
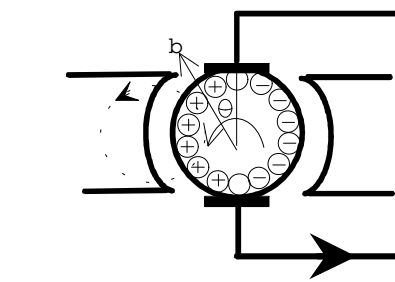
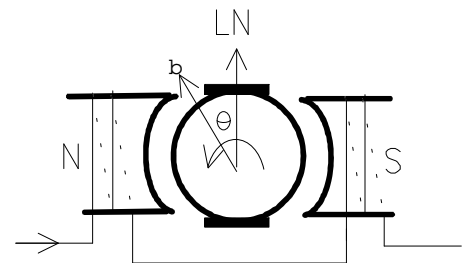
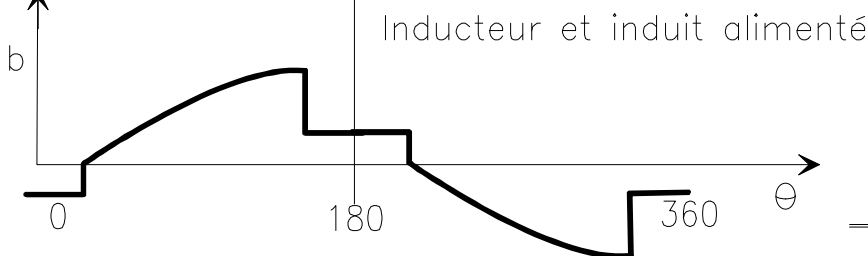
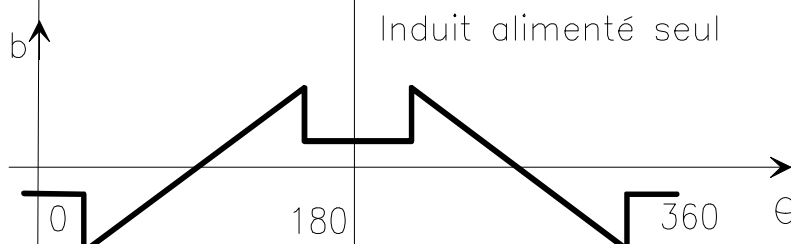
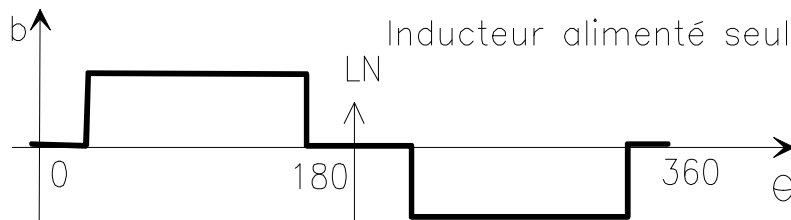


Inducteur seul alimenté



Induit seul alimenté

2.3.1 REACTION D'INDUIT



Réaction d'induit dans une machine à courant continu

La réaction d'induit :

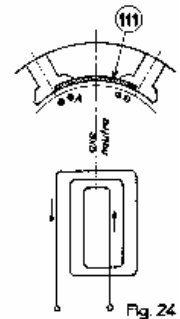
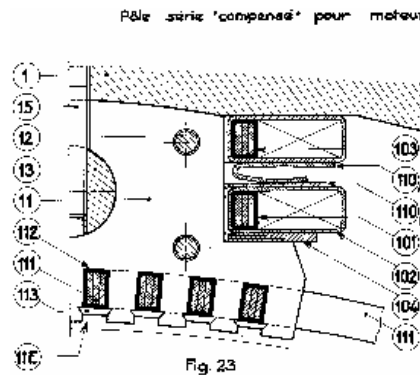
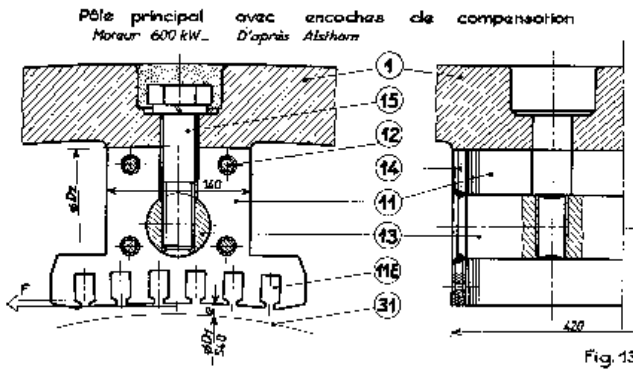
- crée du flux sur la ligne neutre à donc une mauvaise commutation,
- diminue le flux utile par pôles à donc une instabilité.

2.3.2 COMPENSATION DE LA REACTION D'INDUIT

- Placer sur la ligne neutre des pôles dit de commutation produisant un flux opposé et proportionnel au courant

d'induit (voir figure 4, et figure page 3).

- Augmenter l'entrefer (pis aller).
- Utiliser des pôles avec encoches de compensation (figure 13 page 3).
- Utiliser des pôles avec enroulement de compensation. (figure 23 page 3).



3 F.E.M. ET COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

3.1 F.E.M

- Machine bipolaire

L'induit comporte N conducteurs (tous) actifs et tourne à la fréquence de rotation n (tr/s).

Un conducteur met un temps $\Delta t = \frac{1}{N.n}$ pour prendre la place d'un autre.

Il est le siège d'une FEM $e = \frac{\Delta j}{\Delta t} = \Delta j .N.n$

Pour une voie d'enroulement $E = \sum \Delta e = N.n. \sum \Delta j = N.n.\Phi \quad n = \frac{\Omega}{2p}$

$$E = \frac{1}{2p} N.\Omega.\Phi$$

$$E = K.\Omega.\Phi$$

En posant $k = \frac{N}{2p}$ il vient

- Machine multipolaire

La machine possède

\ddot{u} 2a voies d'enroulements (a = paire de voie d'enroulement),

\ddot{u} 2p pôles.

$$E = \frac{2p}{2a} \frac{1}{2p} N.\Phi.\Omega = K.\Phi.\Omega$$

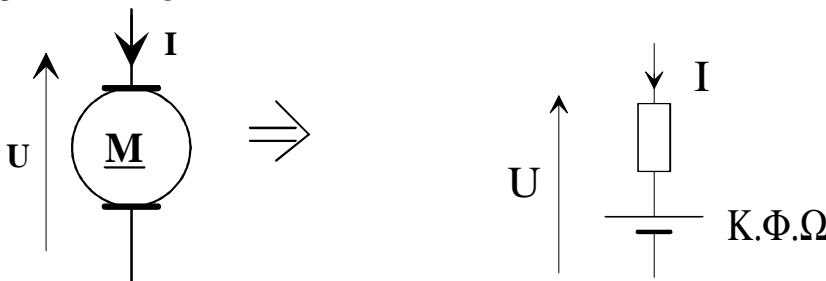
3.2 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

$$P_E = E.I = C_E.\Omega; \quad C_E = \frac{E.I}{\Omega} \quad C = \frac{2p}{2a} \frac{N}{2p} \Phi.I = K.\Phi.I$$

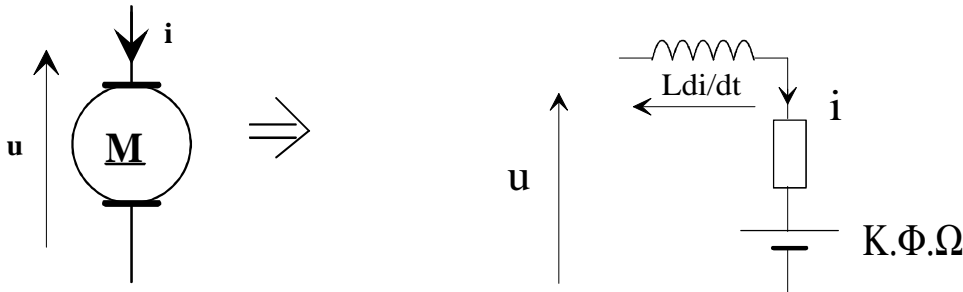
K est appelé constante de FEM et de couple.

3.3 MODELE ELECTRIQUE DE L'INDUIT

3.3.1 EN REGIME ETABLI



3.3.2 EN REGIME VARIABLE



3.4 MODE DE PRODUCTION DU FLUX

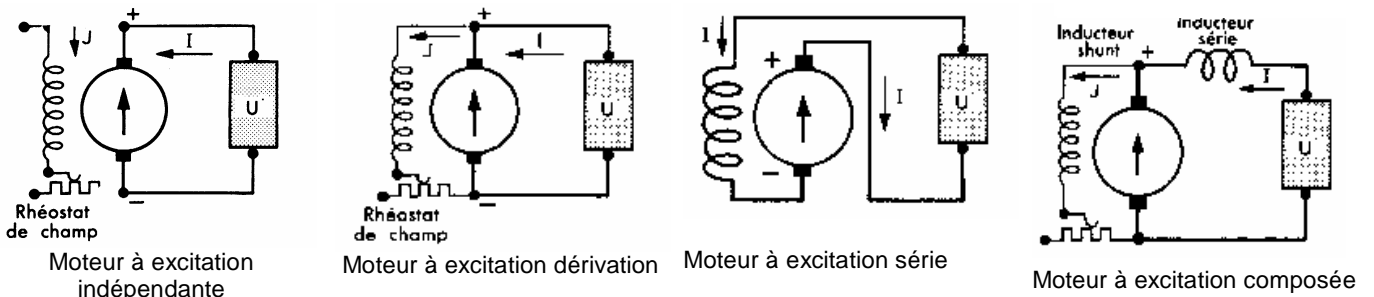
3.4.1 MOTEUR A FLUX FIXE

Moteur à aimant permanent : typiquement un moteur de faible puissance généralement utilisé en robotique.

$$\Phi = \text{constante}; \quad E = \frac{2p}{2a} \frac{N \cdot \Phi}{2p} \Omega = K \cdot \Omega$$

$$C = K \cdot I$$

3.4.2 MOTEUR A FLUX REGLABLE



4 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

4.1 CARACTERISTIQUES A VIDE

4.1.1 FEM EN FONCTION DE L'EXCITATION

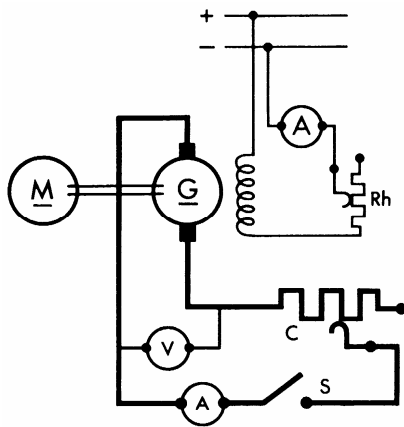
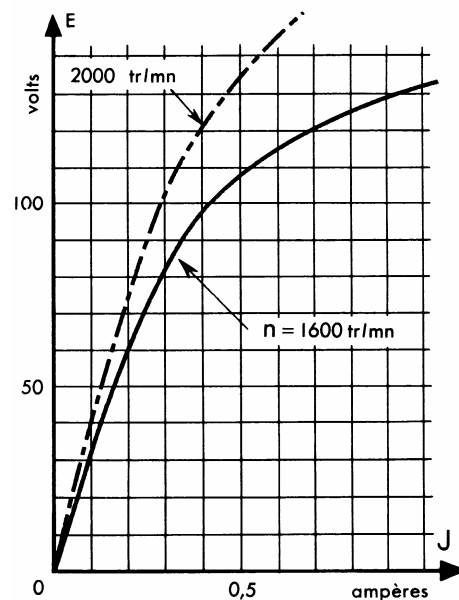


Schéma de montage

$$E = F(J) \Rightarrow \Phi = F(J)$$



4.1.2 FEM EN FONCTION DE LA VITESSE

La F.E.M est strictement proportionnelle à la vitesse (3.1.)

4.2 CARACTERISTIQUES EN CHARGE

4.2.1 FONCTIONNEMENT EN GENERATEUR U(I)

$$U = E - r_a I = K \cdot \Phi \cdot \Omega - r_a I$$

Si la machine est parfaitement compensée c'est un droite de pente $-r_a$
 Dans le cas contraire E diminue en fonction de I (réaction d'induit).

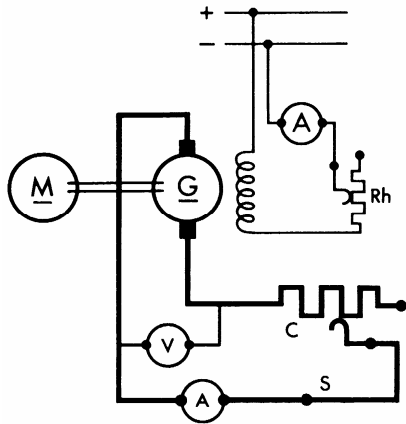
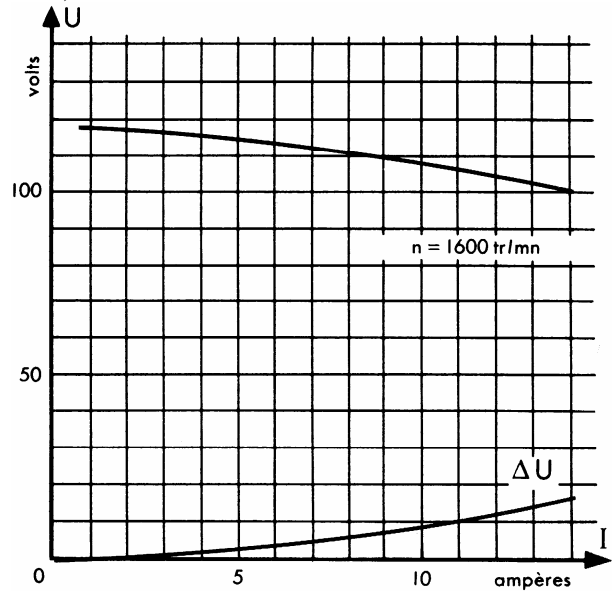


Schéma de montage



4.2.2 MOTEUR A EXCITATION CONSTANTE

Remarques : pour une machine parfaitement compensée, toutes les courbes sont des droites.

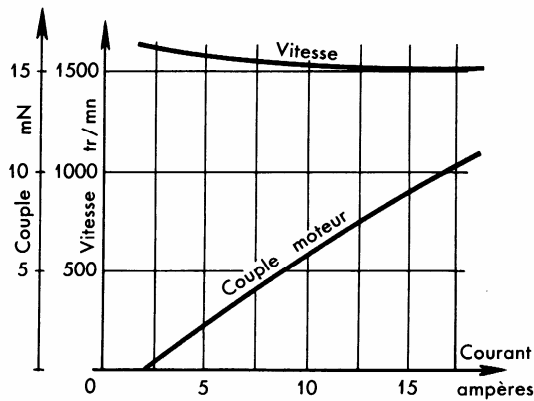
$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$$C_E = K \cdot \Phi \cdot I$$

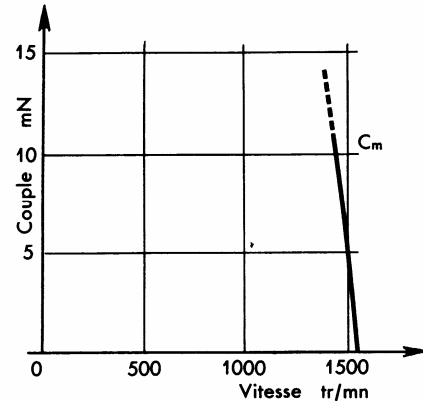
$$\Omega = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{U - r_a \cdot I}{K \cdot \Phi}$$

$$C_E = \frac{K \Phi}{r_a} (U - K \Phi \cdot \Omega)$$

4.2.2.1 CARACTÉRISTIQUES RÉELLE : $W = F(I)$, $C=F(I)$, $C= F(W)$

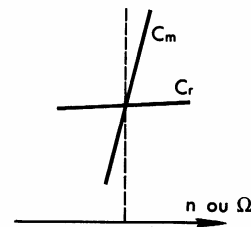
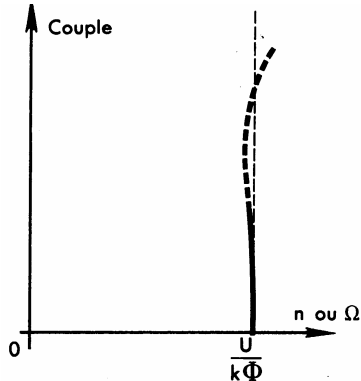


$N=F(I)$; $C=F(I)$



$C= F(N)$

4.2.2.2 STABILITE



Lorsque le couple moteur croît, avec la vitesse le fonctionnement devient instable

La caractéristique utile de la machine est en trait plein.

4.2.3 MOTEUR A EXCITATION SERIE

4.2.3.1 CARACTERISTIQUES

1. Machine non saturée : le flux est proportionnel à I

$$C_E = K \cdot \Phi(I) \cdot I = A \cdot I^2$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = A \cdot I \cdot \Omega \approx U$$

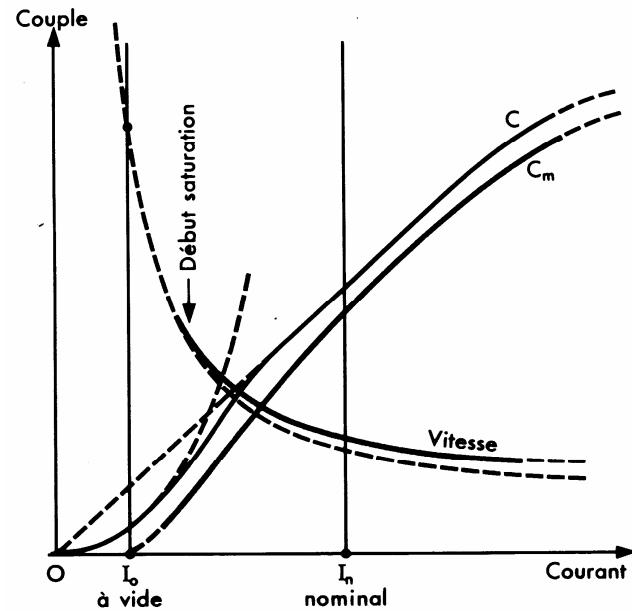
$$\Omega = \frac{U}{A \cdot I}$$

2. Machine saturée : le flux est sensiblement constant \Rightarrow caractéristiques d'une machine à flux constant.

4.2.3.2 PROPRIETES

- La vitesse doit toujours être accouplé à la charge.
- La vitesse varie beaucoup avec la charge.
- Le couple augmente plus vite que le courant.

Moteur utilisé en traction électrique et en levage



5 DEMARRAGE DES MOTEURS

5.1 CONDITIONS

A l'arrêt la F.E.M du moteur est nulle : le courant s'établit à la valeur $I = U/r_a$ (valeur destructrice).

Pour limiter le courant on peut :

1. réduire la tension d'induit
 - en alimentant le moteur par un générateur de tension variable
 - en plaçant une résistance en série avec l'induit (rhéostat de démarrage)
2. alimenter l'induit avec un générateur à courant constant.

5.2 CALCUL D'UN RHEOSTAT DE DEMARRAGE

$$C_E = K \cdot \Phi \cdot I; \quad I = \frac{U - E}{r_a} = \frac{U}{r_a} - \frac{K \cdot \Phi}{r_a} \Omega$$

$$C_E = K \cdot \Phi \left(\frac{U}{r_a} - \frac{K \cdot \Phi}{r_a} \Omega \right) = K \cdot \Phi \left(\frac{U}{r_a} - \frac{K \cdot \Phi \cdot p \cdot N}{r_a \cdot 30} \right)$$

Lorsque le couple est nul la vitesse est de :

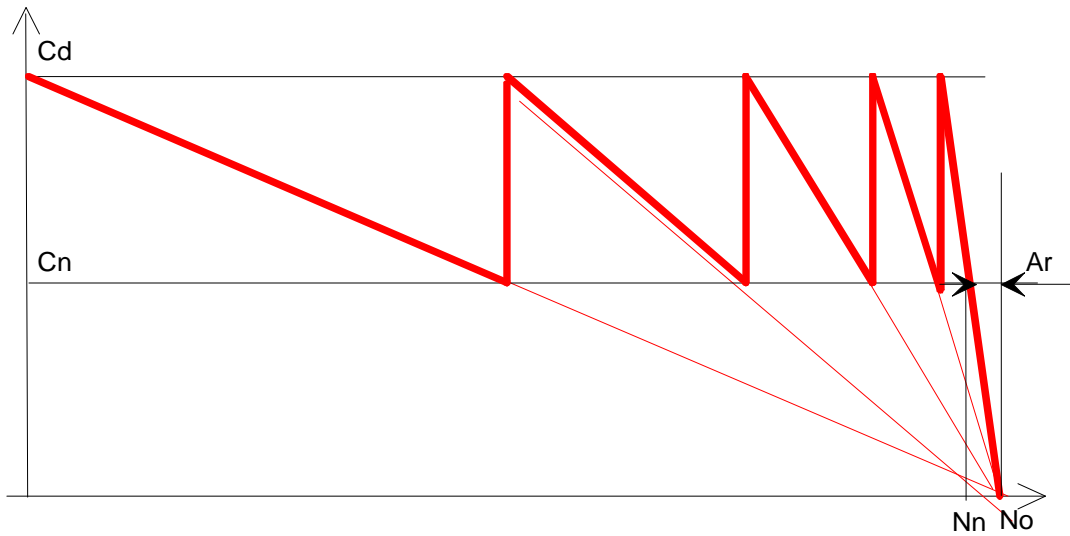
$$\Omega_0 = \frac{U}{K \cdot \Phi} \quad \text{et} \quad N_0 = \frac{30}{p} \frac{U}{K \cdot \Phi}$$

La différence de vitesse entre N_0 et N_N s'exprime par :

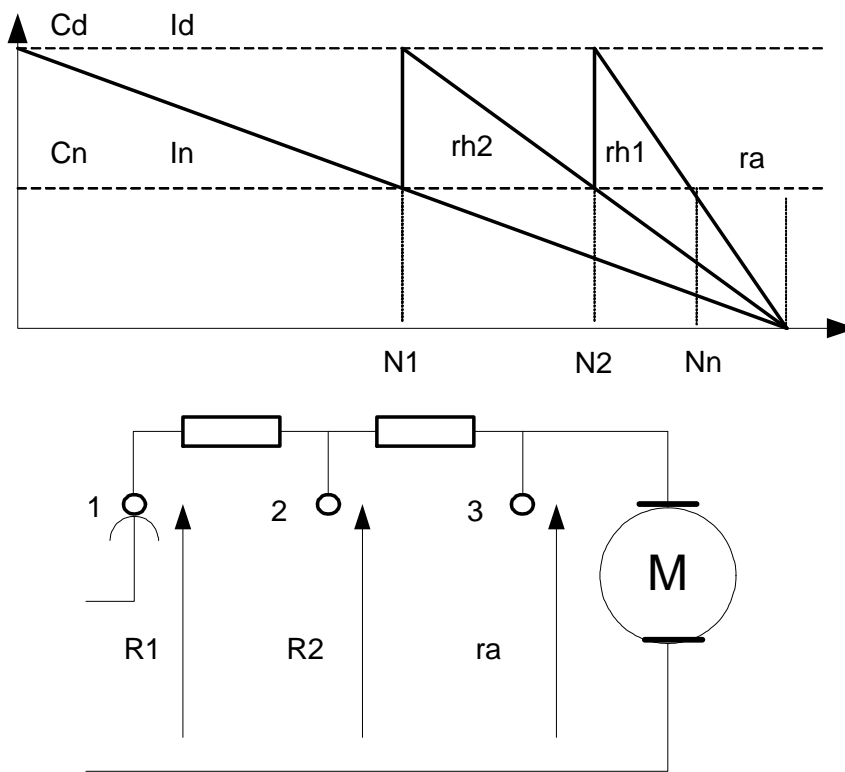
$$N_N = \frac{30}{p} \left(\frac{U}{K \cdot \Phi} - \frac{r_a}{K \cdot \Phi} C_N \right)$$

$$N_0 - N_N = \frac{30}{p} \frac{r_a}{(K \cdot \Phi)^2} C_N$$

Pour un couple C_N constant : $N_0 - N_N = A \cdot r_a$ avec A facteur d'échelle.



5.3 CALCUL OPTIMISE D'UN RHEOSTAT DE DEMARRAGE



Hypothèse $C_d \approx 2C_n$

Sur le plot 1 pour $C = C_n \Rightarrow I = I_n$ et $N = N_1$

$$N_1 = \frac{U - R_1 I_n}{K\Phi}$$

En passant sur le plot 2 pour $C = C_d \Rightarrow I = I_d$ et $N = N_1$

$$N_1 = \frac{U - R_2 I_d}{K\Phi} = \frac{U - R_1 I_n}{K\Phi}$$

et

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{I_d}{I_n} = 2$$

Sur le $N^{\text{ième}}$ plot (ici 3) la résistance = r_a .

Pour trouver R_1, R_2, \dots il faut établir une progression de raison

$$\frac{I_d}{I_n} \quad \text{ou} \quad \frac{C_d}{C_n} \quad (\text{ici } 2)$$

de 1^{er} terme ra et le dernier terme :

$$R_1 = Rh_1 + Rh_2 + \dots + ra$$

$$R_1 = ra * 2^{n-1} \quad \text{avec } n = \text{nb de plots}$$

$$2^{n-1} = \frac{R_1}{ra} \quad n \text{ doit être entier}$$

Le problème revient à chercher la raison de la progression

$$R_1 = ra * q^{n-1} \quad \text{avec } q \text{ la raison de la progression}$$

Finalement on obtient

ra

$$R_{n-1} = ra.q$$

$$R_{n-2} = ra.q^2$$

...

$$R_{n-i} = ra.q^i$$

$$\text{et } R_1 = U / I_d$$

Exemple :

$$Ra = 0,12 \, \Omega, U=120V \quad N_n = 1400 \text{ tr/mn} \quad I_n=35 \text{ A} \quad I_d = 2 \text{ In}$$

$$1. \quad I_d = 70 \text{ A}$$

$$\text{On a } R+ra = 120/70 = R_1 = 1,71 \, \Omega$$

$$2. \quad 1,71 = 0,12 \cdot 2^{n-1}$$

$$2^{n-1} = 1,71 / 0,12 = 14,25$$

Comme n doit être entier on a

$$n-1 = \frac{\text{Log}14,25}{\text{Log}2} = 3,83 \text{ soit } n-1 = 4 \Rightarrow n = 5$$

La raison de la progression est calculée par

$$1,71 = 0,12 \cdot q^{5-1}$$

$$1,71/0,12 = q^4 = 14,25$$

$$q = \frac{\text{Log}14,25}{4} = 1,943$$

On aura

$$Ra = 0,12 \, \Omega$$

$$Rh_1 = 1,71 - 0,876 = 0,834 \, \Omega$$

$$R_4 = 0,12 \cdot 1,943 = 0,233 \, \Omega$$

$$Rh_1 = 0,876 - 0,442 = 0,434 \, \Omega$$

$$R_3 = 0,12 \cdot 1,943^2 = 0,442 \, \Omega$$

$$Rh_1 = 0,434 - 0,233 = 0,209 \, \Omega$$

$$R_2 = 0,12 \cdot 1,943^3 = 0,876 \, \Omega$$

$$Rh_1 = 0,233 - ra = 0,113 \, \Omega$$

$$R_1 = 1,71 \, \Omega$$

6 VARIATION DE VITESSE D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU

6.1 PRINCIPE

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$$\Omega = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{U - r_a \cdot I}{K \cdot \Phi}$$

$$C_E = K \cdot \Phi \cdot I$$

Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu on peut :

- agir sur le flux à l'aide du courant d'excitation
- agir sur la tension d'alimentation de l'induit

6.2 VARIATION DE VITESSE PAR ACTION SUR LE FLUX

6.2.1 GENERALITES

Le moteur fonctionnant à flux maximal on ne peut que réduire le flux.

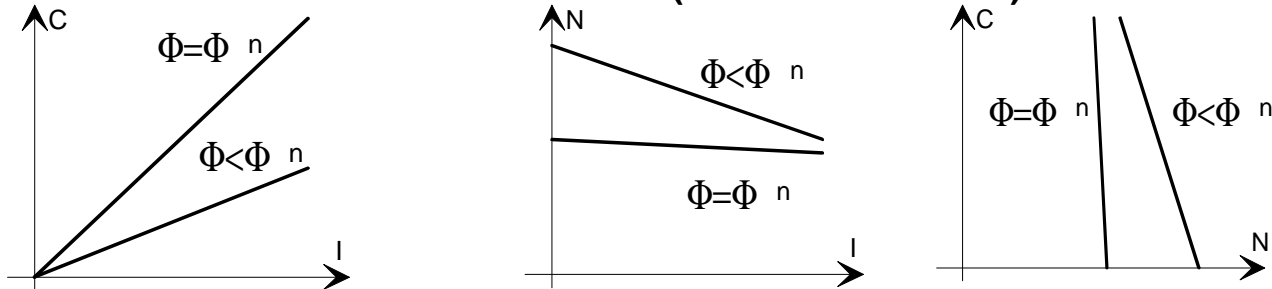
Comme $\Omega \approx \frac{U}{K \cdot \Phi}$ on ne peut qu'augmenter la vitesse (limitée cependant à $2N_n$ sauf pour des moteurs spéciaux).

La puissance consommée par l'excitation est faible devant celle de l'induit (10%), le réglage est simple et économique.

Cependant si Φ diminue :

- la réaction d'induit augmente,
- l'intensité du courant reste limitée à la valeur nominale
- $P = E \cdot I = C \cdot \Omega \approx U \cdot I = \text{constant} \Rightarrow C = U \cdot I / \Omega$:
le couple diminue lorsque la vitesse augmente

6.2.2 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES (EXCITATION SEPARÉE)



6.3 VARIATION DE VITESSE PAR ACTION SUR LA TENSION

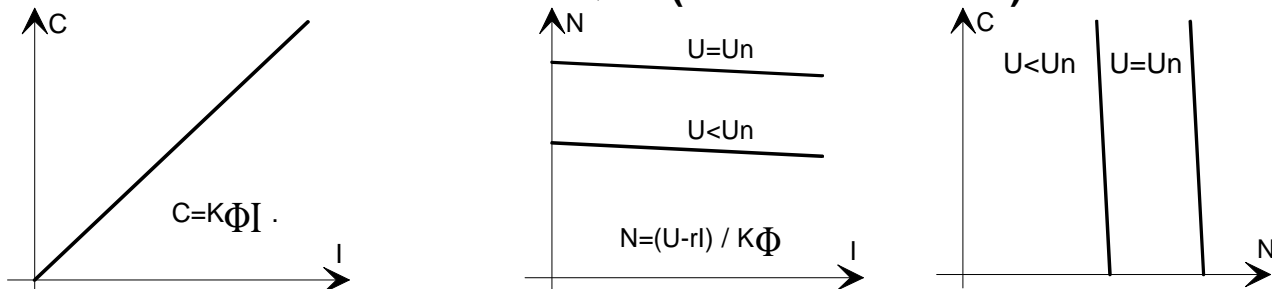
6.3.1 GENERALITES

La tension ne peut qu'être inférieure à la tension nominale $\Omega \approx \frac{U}{K \cdot \Phi}$;

on ne peut que diminuer la vitesse.

Le réglage de la tension ne peut se faire de façon économique qu'à l'aide d'un variateur de tension.

6.3.2 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES (EXCITATION SEPARÉE)



6.4 CHOIX D'UN MOTEUR A VITESSE VARIABLE

Conditions :

- $I \leq I_n$; $U \leq U_n$; $N \leq 2N_n$

6.4.1 REGLAGE PAR LA TENSION : VALEURS LIMITES

$$F = F_{MAX}$$

$$C_{Max} = C_n = K F_{Max} I_n = \text{constant}$$

$$P = C_n W$$

Le fonctionnement est dit à couple constant et puissance variable.

6.4.2 REGLAGE PAR LE FLUX : VALEURS LIMITES

$$F \leq F_{MAX}$$

$$I \leq I_n \quad C \text{ variable} < C_n$$

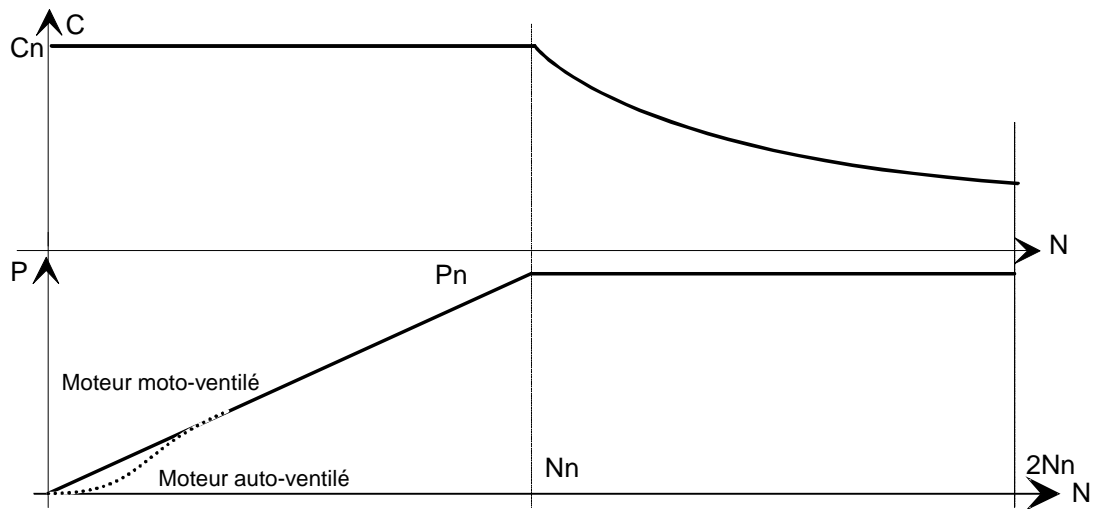
$$P = U \cdot I = \text{constante}$$

Le fonctionnement est dit à puissance constante et couple variable.

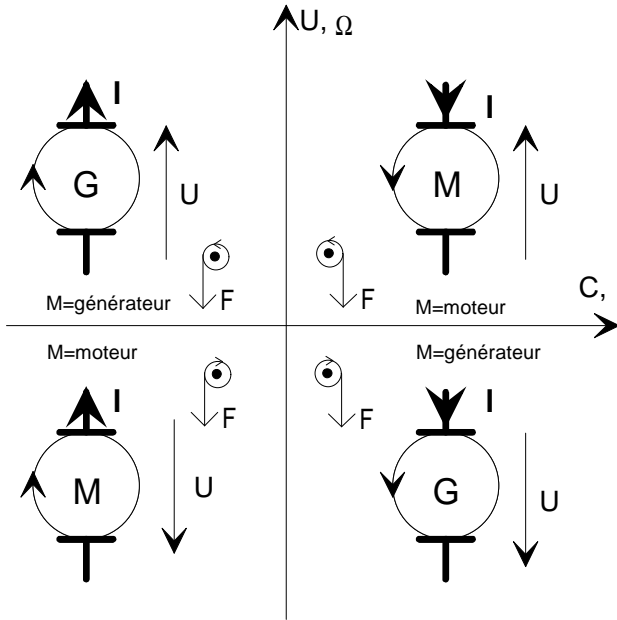
Exercice :

Déterminer le moteur (P_n , N_n) capable de fournir :

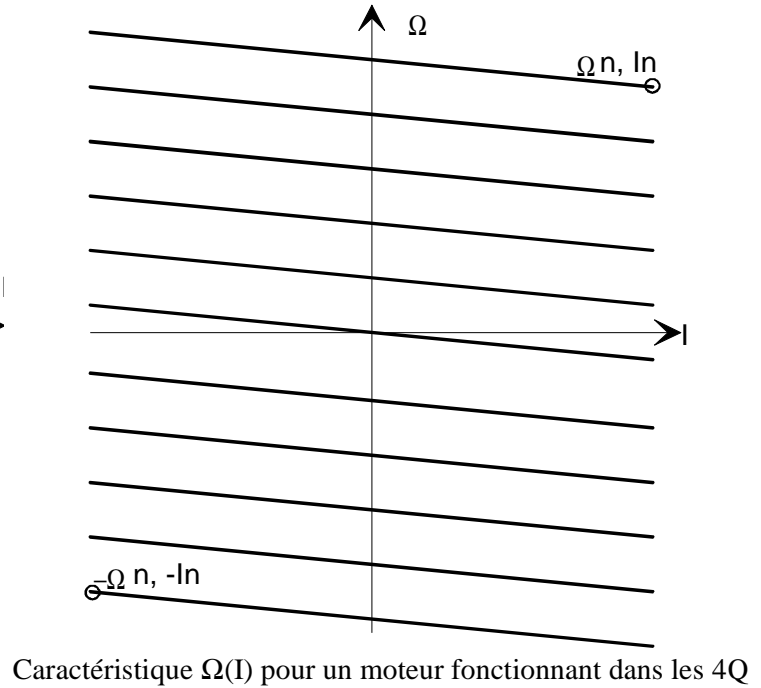
- un couple constant de 32 mN de 200 à 1500 tr/mn
- une puissance constante de 5Kw de 100 à 2000 tr/mn
- une puissance constante de 5Kw de 500 à 2000 tr/mn



6.4.3 QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR



Quadrants de fonctionnement

Caractéristique $\Omega(I)$ pour un moteur fonctionnant dans les 4Q

7 FREINAGE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

- Freinage à contre courant
On inverse la tension aux bornes de l'induit en limitant le courant d'induit
- Freinage rhéostatique
On coupe la tension d'alimentation d'induit et le ferme sur une résistance : la FEM débite dans la résistance et la puissance mécanique est dissipée dans cette résistance.
- Freinage par récupération
On réduit U pour avoir à tout moment $U < E$. Le courant d'induit s'inverse et débite dans la source d'alimentation.

8 RENDEMENT DES MACHINES DES MOTEURS A COURANT CONTINU

8.1 DEFINITION

$$h = \frac{Pu}{Pa} = \frac{Pa - \sum \text{pertes}}{Pa}$$

8.2 ANALYSE DES PERTES

- Une machine à CC comporte des pertes cuivre induit : $r_a \cdot I^2$,
- Des pertes mécaniques appelées par abus de langage, pertes constantes. Ces pertes sont fonction de la vitesse. Comme le moteur industriel fonctionnant à tension constante a une chute de vitesse de l'ordre de 5% de la vitesse nominale ces pertes sont considérées comme constantes.
- Des pertes par courant de Foucault proportionnelle à Ω^2 généralement confondues avec les pertes mécaniques.
- Des pertes d'excitation, pour les machines à excitation réglable.

8.3 RENDEMENT PAR LA METHODE DES PERTES SEPARÉES

8.3.1 PERTES MECANQUES

Les pertes mécaniques ou pertes constantes se déterminent à la vitesse nominale et à flux nominal :

La machine est alimentée sous une tension d'induit telle que sa vitesse est nominale. On mesure P_0

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 = p_{\text{méca}} + r_a \cdot I_0^2$$

Ces pertes comportent également les pertes par courant de Foucault.

8.3.2 PERTES CUIVRE

$$p_{\text{cu}} = r_a \cdot I^2.$$

On mesure r_a par la méthode V.A. rotor bloqué ($E=0$)

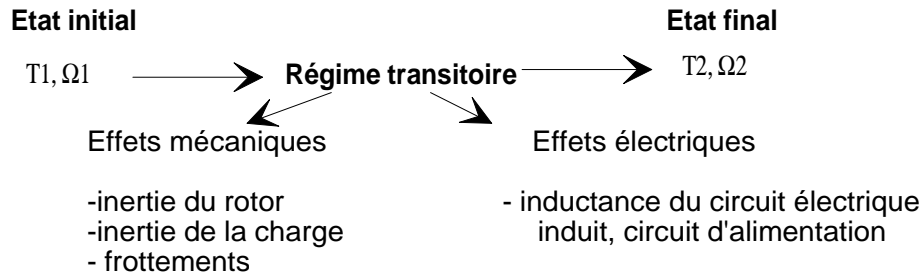
8.3.3 PERTES D'EXCITATION

$$p_{\text{ex}} = U_n \cdot i_d \quad (\text{machine à excitation //})$$

$$p_{\text{ex}} = r \cdot I^2 \quad (\text{machine à excitation série})$$

9 MOTEUR A COURANT CONTINU EN REGIME TRANSITOIRE

9.1 EQUATIONS ELECTROMECHANIQUES DU MOTEUR



Le RT est régi par deux équations

- Une équation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_M - C_R$$

$$C_M = K \cdot I$$

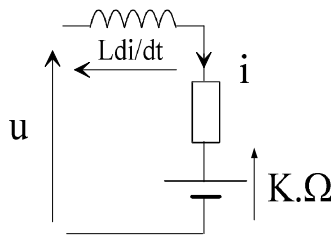
C_R est fonction du type de charge. Généralement

$$C_r = T_f + K_v \cdot \Omega$$

T_f couple de frottement sec indépendant de Ω

$K_v \cdot \Omega$ couple de frottement sec proportionnel à Ω

- Une équation électrique



$$u = K \cdot \Omega + L \frac{di}{dt} + r_a \cdot i$$

- Calcul de la vitesse en fonction du temps
- Hypothèses :
 - moteur alimenté sous tension constante,
 - présence de couple de frottements sec et visqueux.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = K \cdot i - K_v \cdot \Omega - T_f$$

$$\frac{J}{K} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{K_v}{K} \cdot \Omega + \frac{T_f}{K} = i$$

En remplaçant dans l'équation électrique

$$u = \frac{LJ}{K} \frac{d^2\Omega}{dt^2} + \left(\frac{LK_v}{K} + \frac{r_a J}{K} \right) \frac{d\Omega}{dt} + \left(\frac{r_a K_v}{K} + K \right) \cdot \Omega + \frac{T_f}{K}$$