

**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail**

**DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**RESUME THEORIQUE  
&  
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°:25**

**INSTALLATION ET  
DEPANNAGE DE MOTEURS  
ET DE GENERATRICES A  
COURANT CONTINU**

**SECTEUR : ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : EMI**

**NIVEAU : TECHNICIEN**

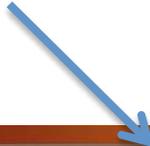
**ANNEE 2007**

## PORTAIL DE LA FORMATION PROFESSIONNELLE AU MAROC

Télécharger tous les modules de toutes les filières de l'OFPPT sur le site dédié à la formation professionnelle au Maroc : [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com)

Pour cela visiter notre site [www.marocetude.com](http://www.marocetude.com) et choisissez la rubrique :

### MODULES ISTA



HOME LIVRES **MODULES ISTA** ANNUAIRE ECOLES DOCTORAT LETTRE DE MOTIVATION NOUS CONTACTER SE CONNECTER

*Maroc Etude.Com* Connaissance - Métier - Technique

[Annonces Google](#) [Emploi Maroc](#) [Messagerie](#) [Telecharger Un Jeu](#) [Maroc Annonces](#)

recherche...

Nous avons 14 invités en ligne

**Annonces Google**

[Annonces Emploi Maroc](#)  
[Jeux Telecharger Gratuit](#)  
[Jeux PC En Ligne](#)

**Connexion**

Identifiant  
sniper

Mot de passe  
.....

Se souvenir de moi

**Connexion**

[Mot de passe oublié ?](#)  
[Identifiant oublié ?](#)

Notre Bibliothèque que ...Livres à Télé charger Gratuitement

**MacKeeper**

**-20%**

Complete your Purchase Now and save 20% Guaranteed with this Coupon Code

Apply Discount Automatically

"On ne jouit bien que de ce qu'on partage" [Madame de Genlis]

**Annonces Google**

[Jeu De Jeux](#)  
[Jeux Sur Internet](#)  
[Ecole Ingénieur](#)

**Dépanner et configurer votre réseau à domicile**

(Outil de Diagnostic)  
Wi-Fi / Ethernet  
Console de jeu  
Imprimante  
Messagerie

**Document élaboré par :**

**Nom et prénom**

**EFP**

**DR**

Mme ELKORNO NAIMA

CDC - GE

**Révision linguistique**

- 
- 
- 

**Validation**

- 
- 
-

## SOMMAIRE

RESUME THEORIQUE .....	7
I. Génératrices à courant continu .....	8
I.1. Constitution .....	8
II. Propriétés des machines à courant continu.....	13
II.1. Force électromotrice induite .....	13
II.2. Réaction d'induit.....	14
II.3. Pôles de commutation.....	15
III. Différents modes d'excitation d'une machine à courant continu .....	16
IV. Essais des génératrices.....	18
IV.1. Marche à vide .....	18
IV.2. Marche en charge.....	21
V. Moteurs à courant continu et leurs caractéristiques : .....	23
V.1. Couple électromagnétique .....	23
V.2. Réversibilité de la machine à courant continu .....	25
V.3. Caractéristiques des moteurs électriques .....	27
V.3.1. Importance de la caractéristique mécanique.....	27
V.3.2. Caractéristiques du moteur à excitation séparée .....	30
V.3.3. Caractéristiques du moteur à excitation shunt .....	33
V.3.4. Caractéristiques du moteur série : .....	33
V.4. Choix d'un moteur à courant continu - caractéristiques mécaniques .....	36
VI. Performances des moteurs.....	37
VI.1. Moteur shunt.....	37
VI.1.1. Démarrage .....	37
VI.1.2. Variation de la vitesse .....	39
VI.1.3. Freinage.....	41
VI.1.4. Inversion du sens de la marche .....	43
VI.2. Moteur série.....	43
VI.2.1. Démarrage .....	43
VI.2.2. Réglage de la vitesse.....	44
VI.2.3. Freinage et inversion du sens de la marche .....	45
VII. Démarrage semi-automatique des moteurs à courant continu .....	47
VII.1. Moteur à excitation en dérivation : .....	47
VII.2. Moteur à excitation en série:.....	49
VII.3. Moteur à excitation composée:.....	51
VIII. Installation et dépannage des machines à courant continu .....	53
VIII.1. Pose des machines .....	53
VIII.2. Entraînement des machines .....	54
VIII.3. Raccordement des canalisations au moteur.....	57
VIII.4. Entretien et réparation des machines électriques.....	58
VIII.5. Démontage, vérification mécanique et électrique .....	58
VIII.6. La méthode de diagnostic.....	61
VIII.7. Exemple de diagnostic.....	62

GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES .....	64
TP-1. Génératrice à excitation indépendante.....	65
TP-2. Démarrage semi-automatique de moteur à excitation shunt.....	71
TP-3. Démarrage semi-automatique d'un moteur à excitation série .....	73
TP-4. Réglage de la vitesse d'un moteur série .....	76
TP-5. Freinage électrique d'un moteur série.....	78
Evaluation de fin de module.....	81

**MODULE 25:**

**INSTALLATION ET DEPANNAGE DE MOTEURS  
ET DE GENERATRICES A COURANT CONTINU**

Code :

Durée : 60 h

**OBJECTIF OPERATIONNEL**

**COMPORTEMENT ATTENDU**

*Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit  
Installer et dépanner des moteurs et des génératrices à courant  
continu et leurs dispositifs de commande.  
selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent*

**CONDITIONS D'EVALUATION**

- A partir :
  - de directives ;
  - de schémas et de plans;
  - d'une panne provoquée.
- A l'aide :
  - des manuels techniques ;
  - de l'équipements, du matériel et de l'outillage.

**CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- *Respect des règles de santé et de sécurité au travail.*
- *Respect des normes en vigueur.*
- *Qualité des travaux.*

**OBJECTIF OPERATIONNEL**

**PRECISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

**CRITERES PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- |   |  |
|---|--|
| <p><b>A)</b> <i>Interpréter les directives, les plans et les manuels techniques.</i></p> <p><b>B)</b> <i>Planifier l'installation.</i></p> <p><b>C)</b> <i>Installer des moteurs, des génératrices à c.c. et leurs dispositifs de commande.</i></p> <p><b>D)</b> <i>Vérifier le fonctionnement.</i></p> <p><b>E)</b> <i>Poser un diagnostic.</i></p> <p><b>F)</b> <i>Dépanner des moteurs, des génératrices à c.c. et leurs dispositifs de commande.</i></p> <p><b>G)</b> <i>Ranger et nettoyer.</i></p> <p><b>H)</b> <i>Consigner les interventions.</i></p> | <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Identification exacte des symboles.</i></li><li>- <i>Repérage de l'information pertinente dans les manuels techniques.</i></li><br/><li>- <i>Détermination exacte des étapes de réalisation de l'installation.</i></li><li>- <i>Choix juste de l'équipement, de l'outillage et du matériel.</i></li><br/><li>- <i>Installation conforme au plan.</i></li><li>- <i>Raccordement correct.</i></li><li>- <i>Fixation solide.</i></li><br/><li>- <i>Respect des étapes de vérification.</i></li><li>- <i>Fonctionnement correct.</i></li><br/><li>- <i>Justesse du diagnostic.</i></li><li>- <i>Choix judicieux des correctifs à apporter.</i></li><br/><li>- <i>Choix approprié du composant de remplacement.</i></li><li>- <i>Démontage correct</i></li><li>- <i>Montage correct.</i></li><li>- <i>Fonctionnement correct.</i></li><br/><li>- <i>Rangement approprié et propreté des lieux.</i></li><br/><li>- <i>Pertinence des informations présentées.</i></li></ul> |
|---|--|

## **PRESENTATION DU MODULE**

*L'objectif de ce module est de faire acquérir aux stagiaires les connaissances relatives aux divers types de moteurs et de génératrices à courant continu, à l'interprétation des dispositifs de commande, au diagnostic de fonctionnement ainsi qu'au remplacement de composants défectueux. Il vise donc à rendre le stagiaire apte à installer et dépanner des moteurs et des génératrices à c.c. et leurs dispositifs de commande.*

*La durée du module est de 60h dont 23 heures de théorie, 33 heures de pratique et 4 heures d'évaluation.*

**MODULE 25: INSTALLATION ET DEPANNAGE DE MOTEURS ET DE  
GENERATRICES A COURANT CONTINU**

**RESUME THEORIQUE**

## I. Génératrices à courant continu

### I.1. Constitution

Une machine à courant continu comporte trois parties principales : l'inducteur, l'induit et le collecteur avec les balais.

#### a) Inducteur

L'inducteur produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles) (fig.1.1) les bobines magnétisantes sont portées par deux noyaux polaires (fig.1.2), montés à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les noyaux polaires sont formés de tôles d'acier doux. Les bobines magnétisantes sont alimentées en courant continu et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation.

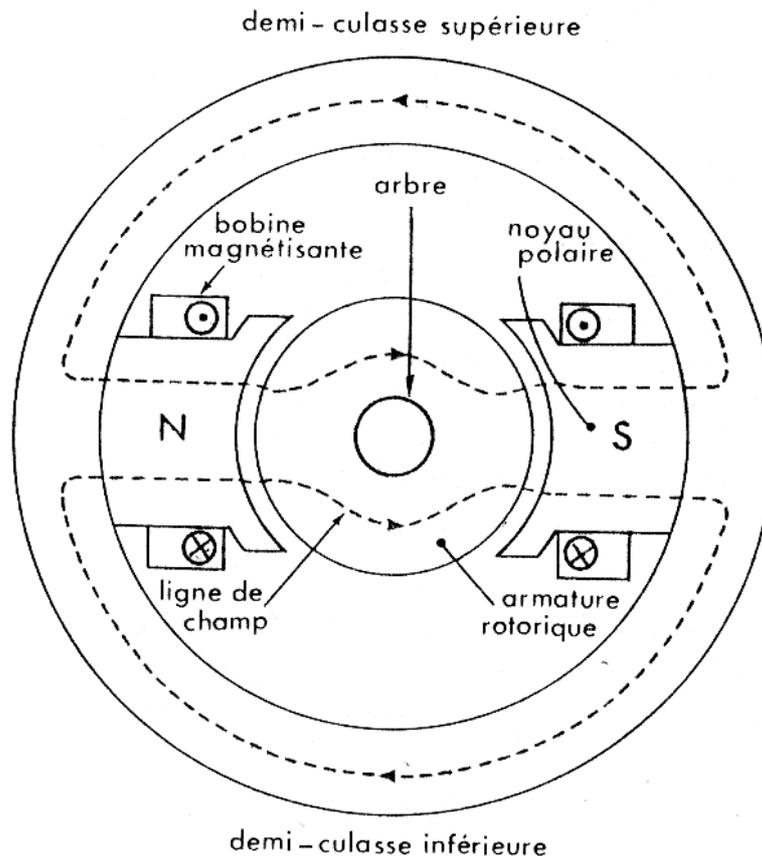


Fig. 1.1.

Le nombre de pôles que porte l'inducteur dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus elle aura de pôles.

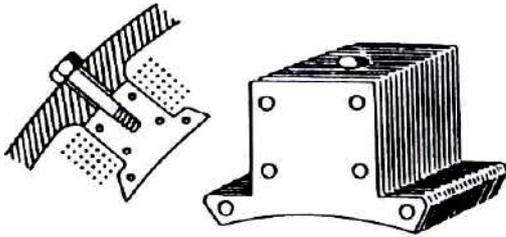


Fig. 1.2 - Pôle d'inducteur

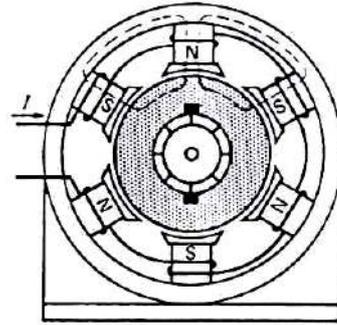


Fig. 1.3 - Polarité magnétique  
d'une génératrice à 6 pôles

Les bobines magnétisantes d'un inducteur multipolaire (qui comporte un nombre de pôles  $2p$  supérieur à deux) sont connectées de façon à ce que les pôles adjacents aient des polarités magnétiques contraires (fig.1.3).

Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et portent un courant relativement faible. Elles sont enveloppées de plusieurs couches de ruban de coton et bien isolées des noyaux polaires afin de réduire les risques de court-circuit.

Les lignes du champ magnétique produit par l'inducteur traversent deux fois l'entrefer qui sépare le rotor et le stator et se renferment par l'une des deux demi-culasses. L'entrefer est de l'ordre de 1,5 mm à 5 mm pour des machines de faible et moyenne puissance.

En réduisant la longueur de l'entrefer on peut diminuer les dimensions des bobines magnétisantes.

Sous les pôles, dans l'entrefer, les lignes de champ sont pratiquement radiales et le vecteur  $\vec{B}$  a une norme sensiblement constante (fig.1.4).

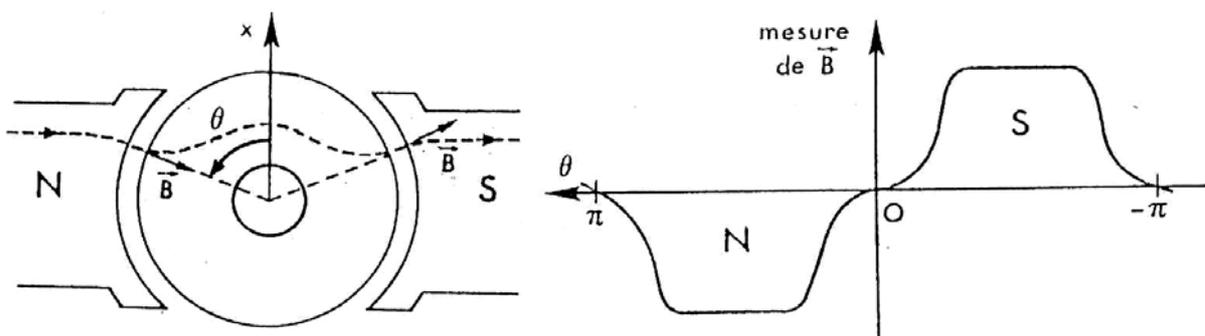


Fig. 1.4 – variation du champ dans l'entrefer

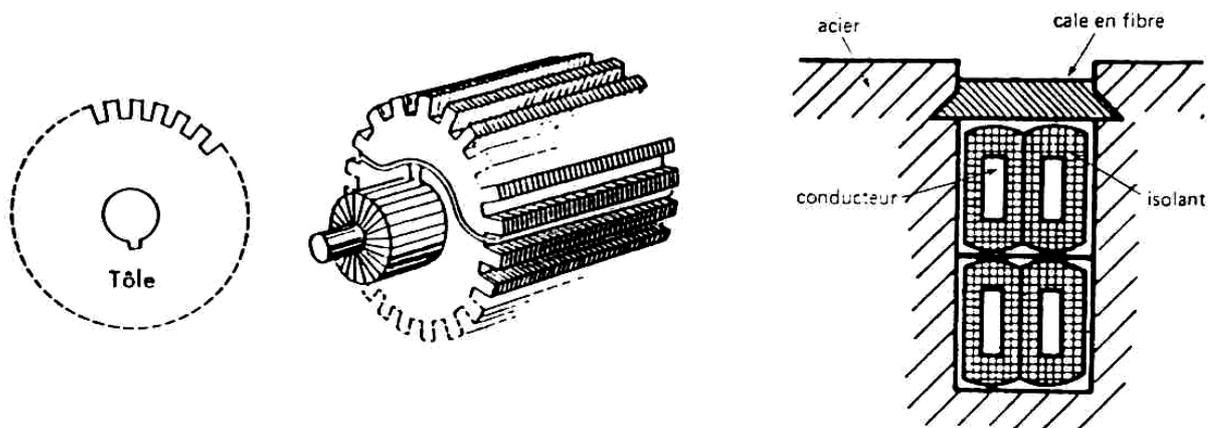
Remarquons que le rotor n'entraîne pas les lignes de champ dans son mouvement: la topographie du champ magnétique n'est pratiquement pas modifiée par la rotation de l'armature.

**b) L'induit**

L'induit constitue l'ensemble des conducteurs qui coupent le flux magnétique. Ces conducteurs sont enroulés sur un noyau cylindrique (fig.1.5a) formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les conducteurs (fig.1.5a).

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par plusieurs couches de papier ou de mica. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre (fig.1.5b). Si le courant est faible, on emploie des conducteurs ronds, mais s'il dépasse une cinquantaine d'ampères, on se sert de conducteurs rectangulaires qui permettent une meilleure utilisation du volume de l'encoche.

L'induit est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur.



a) Le noyau d'induit composé d'un empilage de tôles d'acier

b) Les conducteurs retenus dans les encoches par des cales en fibre

Fig. 1.5

**c) Collecteur et balais**

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci (fig.1.6a). Les conducteurs de l'induit sont reliés aux lames du collecteur. Dans une génératrice bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur et assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur (fig.1.6b).

La construction du collecteur demande un soin considérable, car, si une des lames dépasse les autres d'une fraction de millimètre seulement, des étincelles seraient produites par le rebondissement des balais quand la machine est en charge. De telles étincelles rongeraient et détérioreraient les balais, tout en surchauffant et en carbonisant le collecteur, ce qui ne peut être toléré.

Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles. Par exemple, une génératrice ayant 6 pôles possède 6 balais, dont 3 positifs (+) et 3 négatifs (-). Les balais (+) sont reliés ensemble pour former la borne positive de la machine. De même, les balais (-) sont reliés ensemble pour en former la borne négative (fig.1.6c).

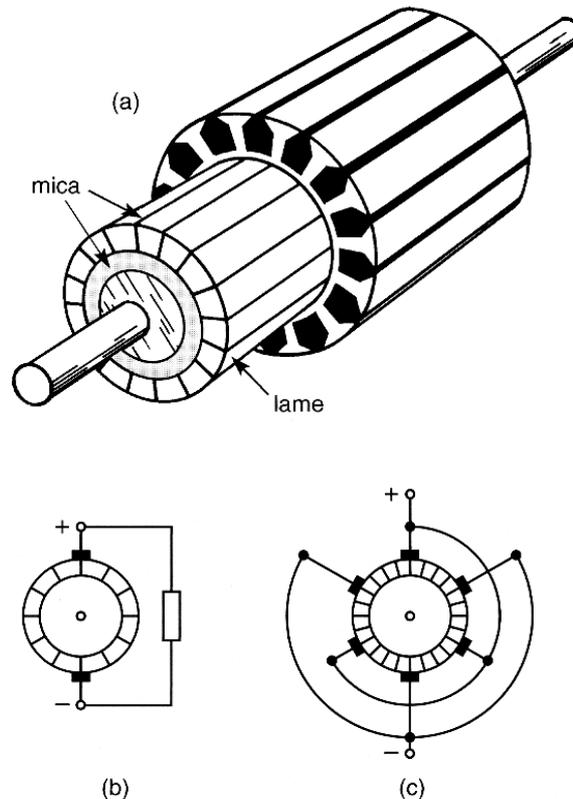


Fig. 1.6

Les balais sont faits en carbone car ce matériau possède une bonne conductivité électrique et il est assez doux pour ne pas user indûment le collecteur. Pour améliorer leur conductivité, on ajoute parfois au carbone une petite quantité de cuivre.

La pression des balais sur le collecteur peut être réglée à une valeur appropriée grâce à des ressorts ajustables (fig.1.7). Si la pression est trop grande, le frottement provoque un échauffement excessif du collecteur et des balais. Par contre, si elle est trop faible, le contact imparfait peut produire des étincelles.



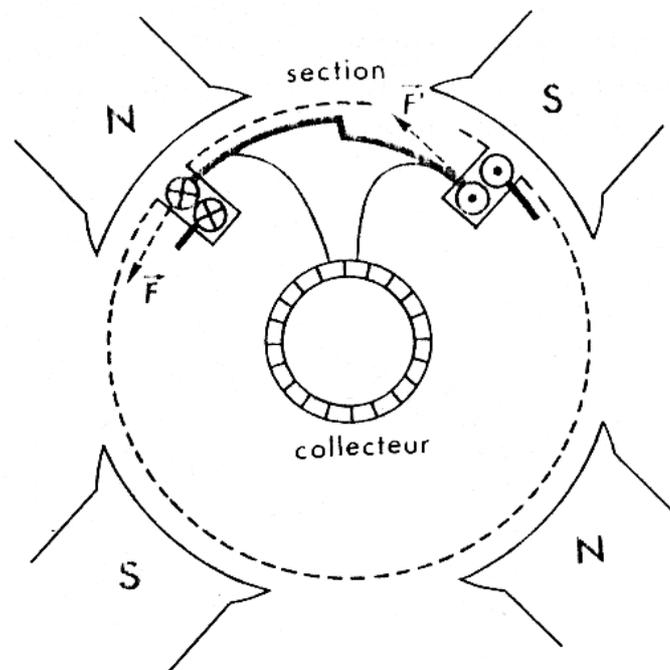
Fig. 1.7

➤ **Zone neutre**

Les zones neutres sont les endroits situés à la surface de l'induit où la densité du flux est nulle. Lorsque la génératrice fonctionne à vide, les zones neutres se trouvent exactement à mi-chemin entre les pôles. Aucune tension n'est induite dans une bobine traversant une zone neutre, c'est pourquoi on cherche à disposer les balais autour de collecteur afin qu'ils soient en contact avec les bobines franchissant ces zones neutres. On assure en même temps une tension maximale entre les balais.

➤ **Génératrices multipolaires**

Lorsqu'une machine à courant continu doit avoir une puissance élevée (plusieurs kilowatts), elle n'est plus bipolaire. Son stator comporte un nombre de pôles  $2p$  supérieur à deux, ces pôles alternativement Nord et Sud sont régulièrement disposés à la périphérie du rotor (fig. 1.8). Son enroulement d'induit présente alors  $2a$  voies (nombre pair) en parallèle.



Génératrice multipolaire  
Fig. 1.8.

Les solutions technologiques retenues sont diverses mais les principes adoptés restent valables comme pour l'enroulement bipolaire à deux voies :

- Chaque encoche contient toujours deux faisceaux superposés;
- L'enroulement, fermé sur lui-même, est constitué de sections identiques connectées en série; chacune de ces sections comporte un faisceau périphérique dans une encoche et un faisceau profond dans l'autre, son entrée soudée à une lame du collecteur et sa sortie à une autre lame;
- L'ouverture des sections est égale à l'angle séparant deux pôles successifs, c'est-à-dire égale au pas polaire  $\pi / p$ ; ainsi, pour chaque section, le faisceau périphérique d'une part et le faisceau profond d'autre part occupent, à tout

instant, la même position par rapport au pôle en regard; les forces électromagnétiques s'exerçant sur les deux faisceaux sont constamment égales et de même sens par rapport au rotor.

Grâce aux connexions entre les extrémités des sections et les lames du collecteur, il est possible de réaliser deux sortes d'enroulement :

- Les enroulements imbriqués pour lesquels le nombre de voies  $2a$  est égal à  $2p$  ou à un multiple de  $2p$ .
- Les enroulements ondulés pour lesquels  $2a$  est égal à 2 ou à un multiple de 2.

## II. Propriétés des machines à courant continu

### II.1. Force électromotrice induite

Par suite de la rotation, les conducteurs actifs coupent les lignes du champ magnétique: ils sont donc siège de f.é.m. induites. Il est facile de constater que les f.é.m. induites dans tous les faisceaux appartenant à une même voies sont de même sens le long de cette voie: la f.é.m.  $E$  dans une voie est la somme des f.é.m. induites dans tous les conducteurs actifs de cette voie.

La f.é.m. d'une voie retrouve la même valeur lorsque le rotor a tourné d'un pas d'encoche: cette f.é.m. ondule très peu autour de sa valeur moyenne  $\bar{E}$  (on confond désormais  $E$  et  $\bar{E}$ ). Les  $2a$  voies de l'enroulement d'induit étant en parallèle,  $E$  est aussi la f.é.m; de la machine.

Lorsqu'un conducteur actif passe d'une ligne neutre à la suivante, il coupe un flux  $\Phi$ ; si  $\Delta t$  est le temps correspondant, la f.é.m.  $e$  induite dans un tel conducteur a pour valeur moyenne

$$e = \Phi / \Delta t$$

Or, si la fréquence de rotation est  $n$  tours/seconde, la durée de 1 tour a pour expression

$$1 \text{ seconde} / n = 1 / n \text{ [s]}$$

Le passage d'un conducteur sous un pôle étant  $2p$  fois plus bref, l'intervalle de temps  $\Delta t$  est égal à

$$\Delta t = (1/n) / 2p = 1 / 2pn$$

$$\text{d'où: } e = \Phi / (1/2pn) = 2 p n \Phi$$

Chacune des  $2a$  voies comporte  $N / 2a$  conducteurs actifs, si bien que

$$E = (N / 2a) e = (N / 2a) 2p n \Phi$$

$$E = \frac{P}{a} N \Phi n \quad \text{où: } \Phi \text{ en Wb; } n \text{ en tr/s; } E \text{ en V.}$$

## II.2. Réaction d'induit

Jusqu'à présent nous avons supposé que seule la f.m.m. de l'enroulement inducteur agisse sur le circuit magnétique d'une machine à courant continu. Cependant, le passage du courant dans les conducteurs de l'induit crée également une force magnétomotrice qui a pour effet de déformer et d'affaiblir le flux provenant des pôles. L'action magnétique de la f.m.m. de l'induit est appelée réaction d'induit.

Pour comprendre la réaction d'induit, on doit connaître le sens des courants circulant dans les conducteurs de l'induit situés en dessous de chacun des pôles. On peut facilement le déterminer lorsqu'on connaît le sens de rotation de la machine (la loi de Lenz).

L'exemple de la figure.2.1 présente les conducteurs situés en dessous du pôle nord d'une génératrice qui tourne dans le sens antihoraire.

Lorsqu'un générateur fonctionne à faible charge, le faible courant circulant dans l'induit ne modifie pas de façon appréciable le champ magnétique  $\Phi_1$  provenant des pôles (fig.2.1a). Mais quand le courant dans l'induit devient important, il produit une f.m.m. élevée créant un champ magnétique  $\Phi_2$  (fig.2.1b). La somme des champs  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  donne le champ résultant  $\Phi_3$  (fig.2.1c) On constate que la densité du flux augmente sous la moitié gauche du pôle, alors qu'elle diminue sous la moitié droite.

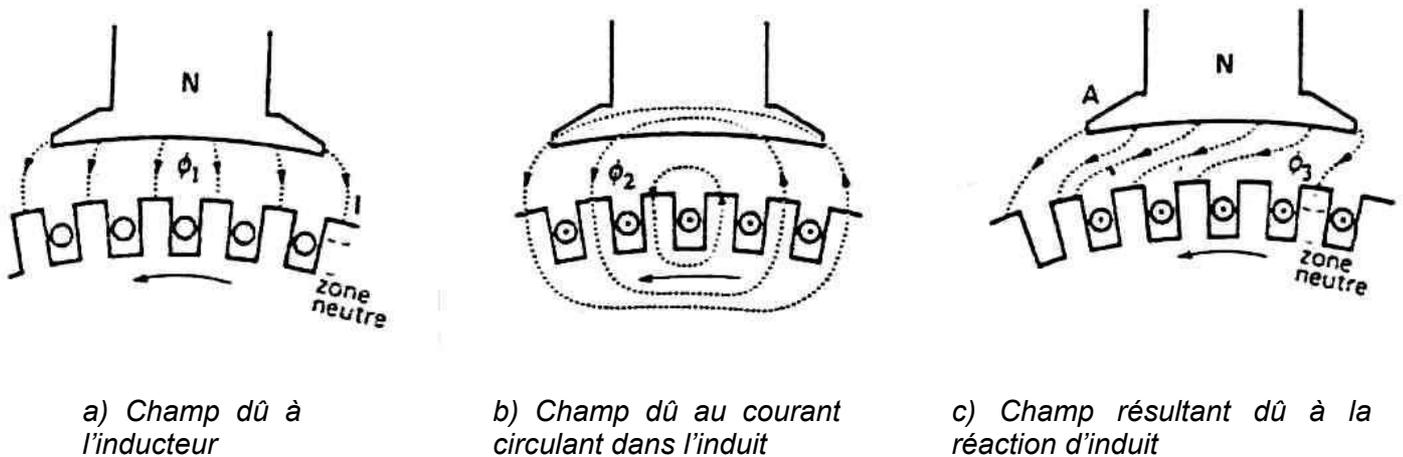


Fig. 2.1.

Ce phénomène a deux conséquences. D'abord, la zone neutre se déplace vers la gauche (avec le sens de rotation). Ensuite, à cause de la saturation de l'extrémité A du pôle, l'augmentation de flux produite sous la partie gauche ne réussit pas à compenser la diminution sous la partie droite; le flux  $\Phi_3$  en charge est légèrement inférieur au flux  $\Phi_1$  à vide. Pour les gros générateurs cette diminution peut être de l'ordre de 5%.

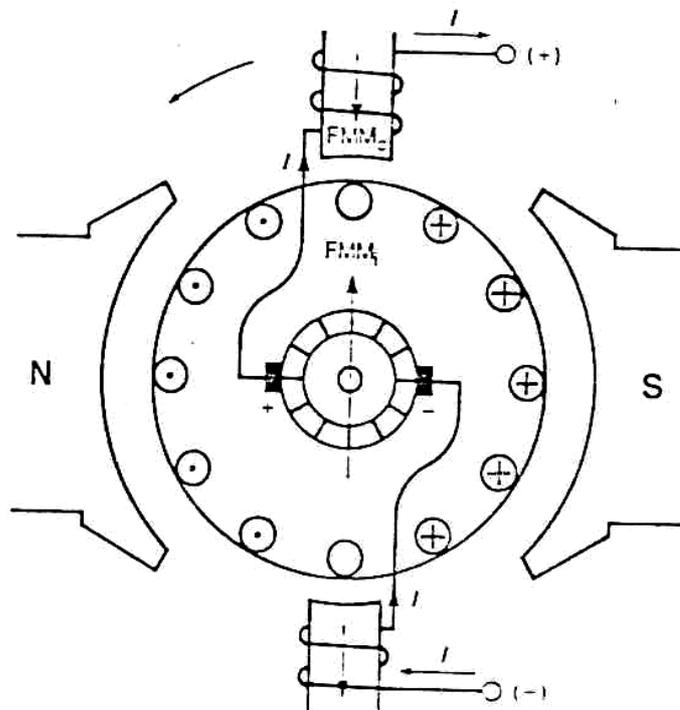
En outre, si l'on veut éviter une mauvaise commutation, on doit réajuster les balais sur la nouvelle zone neutre. Pour les génératrices les balais doivent être déplacés dans le sens de rotation.

Une fois les balais déplacés, la commutation est bonne; cependant, si le courant diminue, la f.m.m. de l'induit baisse et le point neutre occupe une nouvelle position située entre les deux positions précédentes. Il faut alors déplacer à nouveau les balais pour obtenir une commutation sans étincelles. Ce procédé est inacceptable lorsque le courant varie fréquemment et de façon très remarquable. Dans les générateurs de faible puissance (moins que 500 W), on peut se permettre de fixer les balais à une position intermédiaire, ce qui assurera une commutation acceptable pour toutes les charges.

### II.3. Pôles de commutation

Pour compenser l'effet de la réaction d'induit, on dispose entre les pôles ordinaires des machines à courant continu des pôles auxiliaires, ou pôles de commutation, calculés pour développer une f.m.m. égale et opposée en tout temps à la f.m.m. de l'induit (fig. 2.2). L'enroulement des pôles de commutation est donc raccordé en série avec l'induit de façon à ce qu'il soit traversé par le même courant et qu'il développe une f.m.m. proportionnelle au courant d'induit.

On voit sur la figure que la f.m.m. des pôles de commutation s'oppose à la f.m.m. de l'induit, et annule ainsi l'effet de celle-ci. Par conséquent, les bobines qui sont momentanément court-circuitées par les balais se trouvent toujours dans une zone où la densité du flux est nulle. Il n'est donc plus nécessaire de déplacer les balais au fur et à mesure que la charge varie.



Les pôles de commutation produisent une f.m.m. égale et opposée à la f.m.m. de l'induit  
Fig. 2.2

### III. Différents modes d'excitation d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comporte deux circuits électriques: l'enroulement de l'induit et l'enroulement de l'inducteur. Ces deux circuits peuvent être couplés l'un par rapport à l'autre de différentes manières ce qui définit les différents types de machines.

#### a) Génératrice à excitation indépendante

Le flux dans la machine est créé par le passage d'un courant d'excitation  $J$  dans l'enroulement de l'inducteur. Lorsque ce courant continu est fourni par une source indépendante, c'est-à-dire séparée de la machine, on dit que la génératrice est à excitation indépendante ou à excitation séparée (fig.3.1).

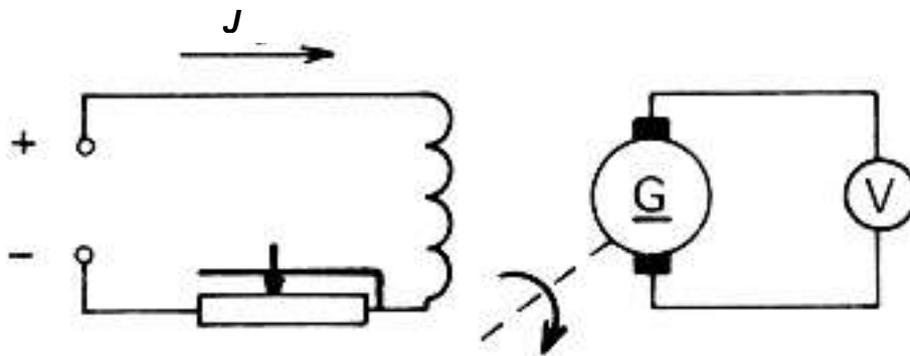


Fig. 3.1

#### b) Génératrice à excitation en dérivation

L'enroulement induit et l'enroulement inducteur sont montés en parallèle: l'induit générateur alimente l'enroulement d'excitation de la machine qu'on appelle auto-excitée (fig.3.2).

L'enroulement inducteur comporte un grand nombre de spires en fil fin, le courant admis sous la tension  $U$  ne devant dériver que de 2% à 5% environ du courant total.

Exemple: Machine 3 kW, 220 V,  $I = 16,5$  A,  $J = 0,56$  A  
Résistances à froid:  $R_{\text{inducteur}} = 270 \Omega$ ;  $R_{\text{induit}} = 1,84 \Omega$

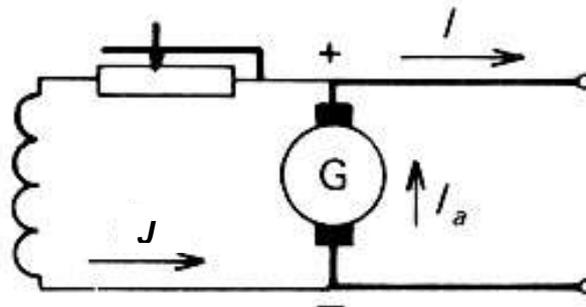


Fig. 3.2

c) **Génératrice à excitation série**

L'enroulement inducteur est en série avec l'induit et ne doit entraîner qu'une chute de tension de 3% environ, il a donc une faible résistance et comporte peu de spires de gros fil (fig.3.3).

Exemple: Machine 3 kW, 220 V,  $I = 15\text{ A}$   
Résistances à froid:  $R_{\text{inducteur}} = 0,55\ \Omega$ ;  $R_{\text{induit}} = 1,1\ \Omega$

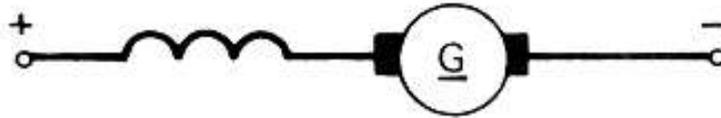
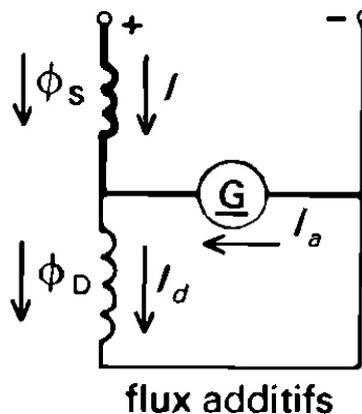


Fig. 3.3

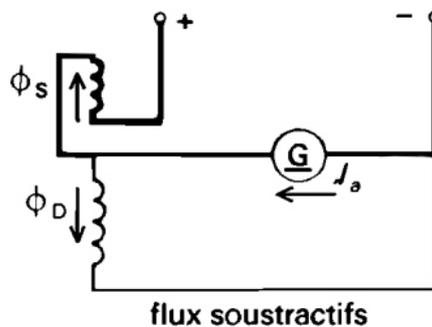
d) **Génératrice à excitation composée**

C'est la combinaison des deux modèles précédents. Les deux enroulements peuvent être montés en courte dérivation (fig.3.4a) ou en longue dérivation (fig.3.4b). Les flux peuvent s'ajouter (flux additifs) ou se retrancher (flux soustractifs).

Il faut noter que ce mode d'excitation est actuellement peu utilisé dans l'industrie.



a) Les enroulements montés en "courte dérivation" (flux additifs)



b) Les enroulements montés en "longue dérivation" (flux soustractifs)

Fig. 3.4

## IV. Essais des génératrices

### IV.1. Marche à vide

#### a) La caractéristique à vide

Quand une dynamo à excitation indépendante tourne à vide, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est raccordée à aucun circuit extérieur et que l'induit ne débite aucun courant, une variation du courant d'excitation ou de la vitesse de rotation entraîne une variation correspondante de la tension induite.

**Effet du courant d'excitation :** Si on augmente le courant d'excitation, la f.m.m. de l'enroulement d'inducteur augmente, ce qui augmente le flux dans la machine. Par conséquent, les conducteurs coupent un plus grand nombre de lignes par seconde et la tension aux bornes de l'induit (entre les balais) augmente. Lorsque ce courant est faible, la perméabilité de l'entrefer étant constante, le flux croît proportionnellement au courant d'excitation. Mais, lorsque le fer de l'inducteur et de l'induit se saturent, la perméabilité diminue et le flux ne croît plus. On dit que la machine est saturée.

Si on trace la valeur de la tension induite en fonction du courant d'excitation, la vitesse de rotation étant maintenue constante, on obtient la courbe de saturation de la génératrice (fig.4.1).

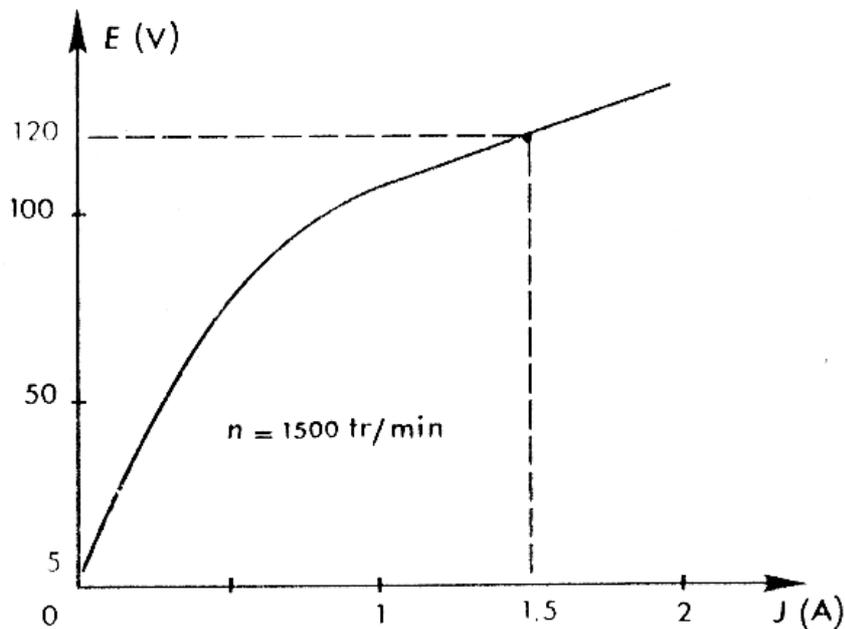


Fig. 4.1

On peut donc faire varier la tension induite à volonté en faisant varier le courant d'excitation. La tension nominale de la machine est habituellement située un peu plus haut que le "coude" de la courbe de saturation.

Quand les bornes du circuit d'excitation sont inversées, le courant circule en sens inverse dans l'enroulement d'excitation, ce qui entraîne le changement de la polarité de la tension induite.

**Effet de la vitesse de rotation :** Lorsqu'on augmente la vitesse de rotation sans faire varier le courant d'excitation, le nombre de lignes coupées par seconde augmente en proportion, ce qui augmente la tension induite. La tension  $E$  est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit (fig. 4.2).

$$E_1 = (p/a) N\Phi n_1$$

$$\Rightarrow E_1 / E_2 = n_1 / n_2$$

$$E_2 = (p/a) N\Phi n_2$$

Quand on change le sens de rotation, la polarité de la tension induite change aussi. Si on change à la fois la polarité de la tension d'excitation et le sens de rotation, la polarité de la tension induite ne change pas.

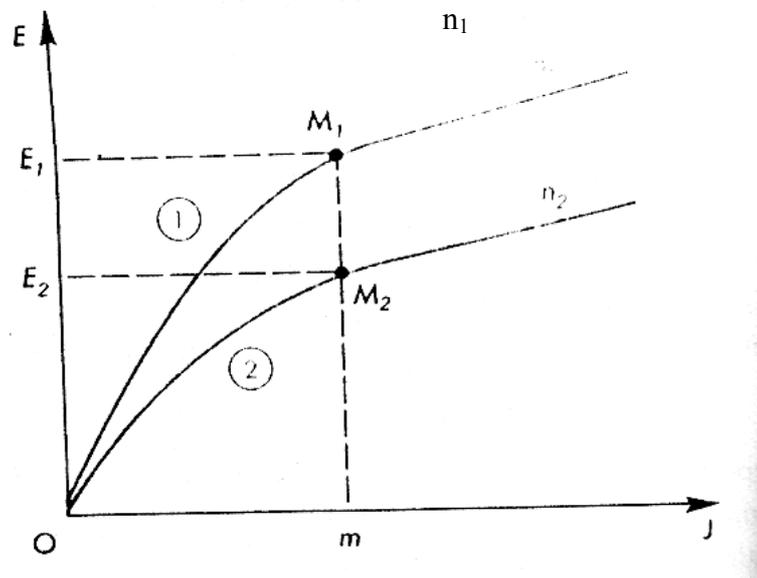


Fig. 4.2

### b) Réglage de la tension induite :

Quand il s'agit d'une génératrice à excitation en dérivation (excitation shunt), dont le grand avantage réside dans le fait qu'elle n'exige aucune source extérieure, on peut facilement régler la valeur de la tension induite au moyen d'une résistance variable intercalée en série avec l'enroulement de l'inducteur (fig. 4.3) Cette résistance variable porte le nom de rhéostat d'excitation.

La tension  $E$  prend sa valeur nominale quand le curseur  $p$  du rhéostat est au milieu. Si on déplace le curseur vers l'extrémité  $m$ , la valeur de la résistance diminue, donc le courant d'excitation augmente, le flux augmente aussi, donc la tension induite augmente. Si on déplace le curseur vers l'extrémité  $n$  il se passe l'inverse et la tension induite diminue.

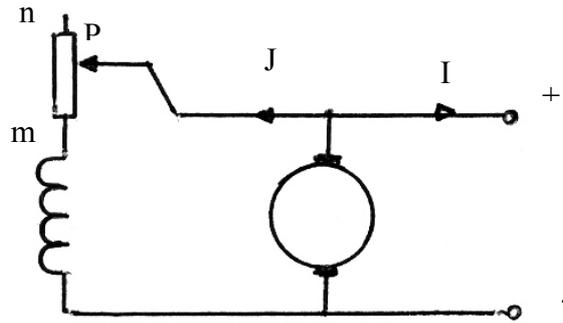


Fig. 4.3

Si l'on connaît la courbe de saturation et la résistance totale  $R_t$  du champ et du rhéostat, on peut facilement déterminer la valeur de la tension induite. Il suffit de tracer sur le graphique de la courbe de saturation, une droite correspondant à la résistance  $R_t$ . Le point de coupure de cette droite avec la courbe correspond à la tension induite. Par exemple (fig.4.4), si la résistance de l'inducteur est de  $50 \Omega$  et si celle du rhéostat est nulle, la droite passe par le point  $E = 50 \text{ V}$ ,  $I = 1 \text{ A}$ . Cette droite coupe la courbe de saturation à un point correspondant à une tension de  $150 \text{ V}$ . Etant donné que la résistance du rhéostat est nulle, cela représente la tension maximale que peut atteindre la génératrice à excitation shunt. En déplaçant le curseur  $p$ , la résistance de l'inducteur augmente et lorsqu'elle est de  $120 \Omega$  on obtient une nouvelle droite coupant la courbe à une tension  $E_0 = 120 \text{ V}$ .

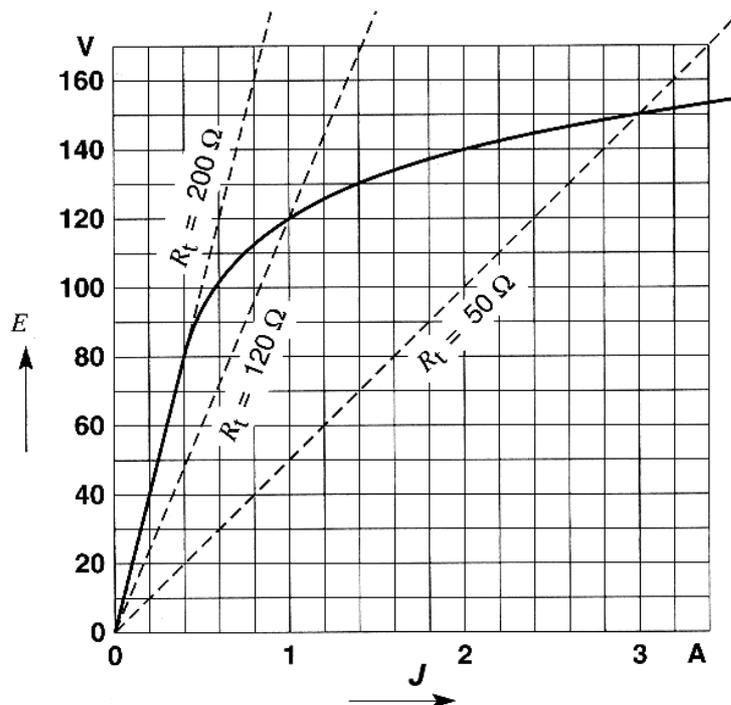


Fig. 4.4 Méthode pour déterminer la valeur de la tension induite

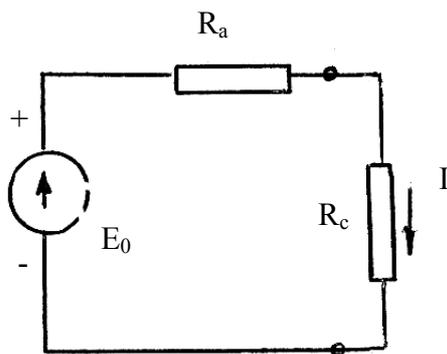
## IV.2. Marche en charge

L'induit d'une génératrice est formé d'un grand nombre de conducteurs ayant une certaine résistance. On appelle résistance de l'induit celle que l'on peut mesurer entre les balais de la machine. Elle est généralement très faible (souvent de l'ordre du centième d'ohm); elle dépend essentiellement de la puissance et de la tension de la machine.

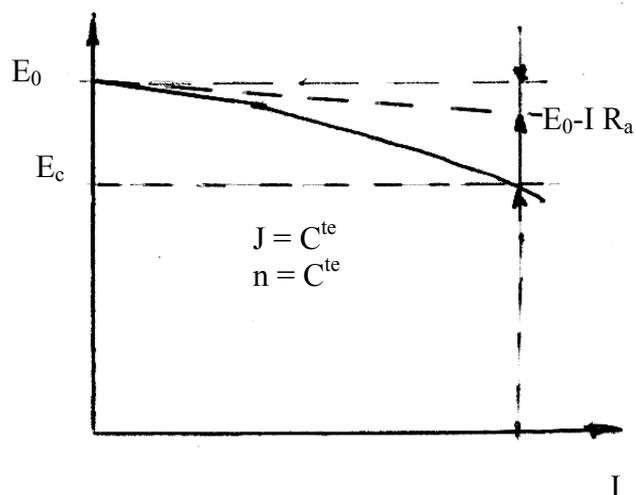
On peut donc représenter le circuit de l'induit par une résistance  $R_a$  en série avec une tension  $E_0$ , cette dernière représentant la tension induite (fig.4.5a). Lorsque la machine tourne à vide, la tension entre les balais  $E_c$  est égale à la tension induite  $E_0$ , car la chute de tension dans la résistance de l'induit est nulle puisqu'il n'y circule aucun courant.

Par contre, lorsque l'on relie l'induit à une charge, ce courant de la charge  $I$  provoque une chute de tension dans la résistance  $R_a$ . La tension  $E_c$  obtenue entre les balais (et par conséquent aux bornes de la charge) est inférieure à la tension induite  $E_0$ . (fig.4.5b)

A mesure que la charge augmente, la tension aux bornes de la charge diminue progressivement. Le graphique représentant cette variation de la tension pour les différentes valeurs du courant débité porte le nom de caractéristique en charge. Outre la résistance de l'induit, le phénomène de réaction de l'induit fait aussi baisser la tension aux bornes de la génératrice. En effet, le passage du courant dans les conducteurs de l'induit donne naissance à une f.m.m. qui tend à déformer et à réduire le flux provenant des pôles. Cet affaiblissement du flux provoque une diminution correspondante de la tension induite  $E_0$  et, par suite, de la tension aux bornes.



a) Circuit équivalent d'une génératrice c.c. en charge



b) Caractéristique en charge d'une génératrice cc

Fig. 4.5

Dans le cas d'une génératrice shunt (à excitation en dérivation), la variation de la tension aux bornes avec le courant débité est plus grande que dans le cas d'une génératrice à excitation indépendante. En effet, la tension induite dans cette dernière est à peu près constante. Ce n'est pas le cas pour la génératrice shunt, car le courant d'excitation et le flux diminuent à mesure que la tension entre les bornes s'abaisse

Pour la génératrice shunt, la baisse de tension entre les conditions à vide et les conditions de pleine charge est de l'ordre de 15%, tandis que pour une génératrice à excitation indépendante, elle est seulement de l'ordre de 10%.

### **EXERCICE:**

Une génératrice à excitation indépendante de 150 kW, 250 V, 350 tr/min a les caractéristiques suivantes:

- Résistance de l'induit:  $15 \text{ m}\Omega$
- Résistance des pôles de commutation:  $10 \text{ m}\Omega$
- Résistance du champ shunt:  $60 \Omega$
- Longueur de l'entrefer:  $5 \text{ mm}$

On estime qu'en pleine charge, la réaction de l'induit diminue le flux d'environ 3%. La tension à vide est ajustée à 260 V. Calculer la valeur de la tension aux bornes lorsque la génératrice débite son courant nominal.

Solution:

Le courant nominal est:

$$I_n = P_n / U_n = 150000 / 250 = 600 \text{ A}$$

$$\text{La chute de tension dans l'induit est: } = R_{\text{induit}} \times I_n = 0,015 \times 600 = 9 \text{ V}$$

$$\text{La chute de tension dans les pôles de commutation est: } = R_{\text{commutation}} \times I_n = 0,010 \times 600 = 6 \text{ V}$$

A cause de la réaction d'induit, la tension induite sous charge est de 3% inférieure à celle induite à vide. Donc,  $E_0$  sous charge vaut:

$$E_0 = 97\% \times 260 \text{ V} = 252 \text{ V}$$

et la tension aux bornes de la génératrice est:

$$E = E_0 - 9 - 6$$

$$E = 252 - 9 - 6 = 237 \text{ V}$$

## **V. Moteurs à courant continu et leurs caractéristiques :**

Les moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu est réversible, c'est-à-dire peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice.

L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'installer des convertisseurs transformant le courant alternatif en courant continu et d'utiliser des moteurs à courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Les moteurs à courant continu ont les mêmes modes d'excitation que les génératrices. On distingue donc :

- les moteurs à excitation indépendante
- les moteurs à excitation à dérivation (excitation shunt)
- les moteurs à excitation série
- les moteurs à excitation compound

De plus, tout comme pour les génératrices, la réaction d'induit se manifeste dans les moteurs, produisant une distorsion et un affaiblissement du flux provenant des pôles, à mesure que la charge augmente. Les problèmes de commutation existent également, c'est pourquoi les moteurs de puissance supérieure à 1 kW contiennent toujours des pôles de commutation.

### **V.1. Couple électromagnétique**

Dans une machine à courant continu présentant les caractéristiques suivantes :

nombre de pôles inducteurs  $2p$   
nombre de voies d'enroulement  $2a$   
nombre de conducteurs actifs  $N$

Supposons que la machine fonctionne en charge, c'est-à-dire que son enroulement d'induit soit parcouru par un courant  $I$  : chaque voie, et par suite chaque conducteur actif, est le siège du courant  $I/2a$ . Les conducteurs, placés dans le champ magnétique sont soumis à des forces électromagnétiques dont la direction est pratiquement tangente au rotor et qui sont toutes de même sens par rapport à l'axe (puisque le sens du courant se renverse quand un conducteur passe d'un pôle sous le suivant).

Lorsque le rotor tourne d'un pas d'encoches (chaque encoche prenant la place de la précédente), il se trouve exactement dans la même disposition par rapport au stator : le couple  $T$ , dû à l'ensemble des forces électromagnétiques, reprend rigoureusement la même valeur, ainsi lorsque le temps s'écoule,  $T$  ondule très peu autour de sa valeur moyenne  $\bar{T}$  (on signale que nous confondrons  $T$  et  $\bar{T}$ ).

La valeur du couple électromagnétique  $T$  est calculée en utilisant l'expression du travail des forces électromagnétiques.

Lorsqu'un conducteur actif passe sous un pôle, c'est-à-dire va d'une ligne neutre (où  $B = 0$ ) à la ligne neutre suivante, il coupe le flux  $\Phi$  dû à l'ensemble des lignes de champ intéressant ce pôle (fig.5.1).

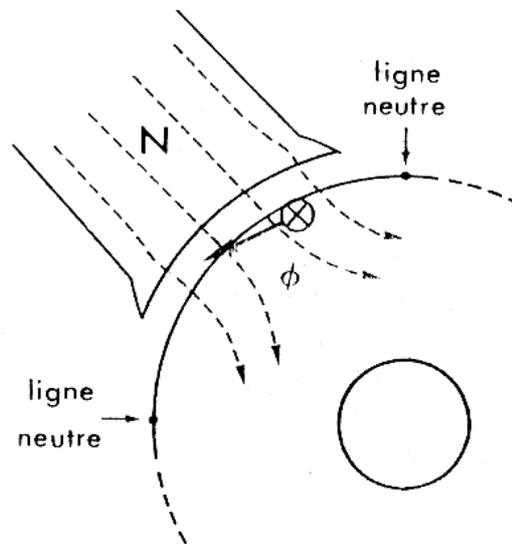


Fig. 5.1

$\Phi$  est appelé **flux utile par pôle** pour une machine donnée, il ne dépend que du courant dans l'enroulement inducteur. Le conducteur considéré étant parcouru par le courant  $I/2a$  la force électromagnétique qui s'exerce sur lui accomplit un travail

$$(I / 2a) (\text{flux coupé}) = (I / 2a) \Phi$$

Lorsque le rotor fait un tour complet, le conducteur passe sous  $2p$  pôles: le travail de la force est  $2p$  fois plus grand que précédemment

$$2p (I / 2a) \Phi = (p/a) \Phi I$$

Le rotor comportant  $N$  conducteurs, le travail de l'ensemble des forces électromagnétiques, pour 1 tour, est

$$N (p/a) (\Phi I) = (p/a) N \Phi I$$

Or, puisque  $T$  est le couple dû à toutes ces forces électromagnétiques, le travail pour 1 tour peut s'écrire  $T (2\pi)$ ; d'où:

$$T (2\pi) = (p/a) N \Phi I$$

$$T = (1/2\pi) (p/a) N \Phi I \quad (\Phi \text{ en Wb}; I \text{ en A}; T \text{ en Nm}).$$

## V.2. Réversibilité de la machine à courant continu

On va faire fonctionner la machine à courant continu successivement en moteur puis en générateur (dynamo).

### a) Fonctionnement en moteur :

La machine à courant continu est accouplée à un dispositif mécanique qui exerce sur son arbre un couple résistant  $T_r$ .

Un générateur débite dans le moteur un courant  $I$ : les forces de Laplace s'exercent sur les conducteurs logés dans les encoches. Le rotor tourne à la fréquence  $n$  (tr/s) dans le sens de ces forces qui sont donc des forces motrices: le couple électromagnétique  $T$  est **moteur**.

La rotation du rotor entraîne la création, dans son enroulement, de la f.é.m. induite  $E$ ; d'après la loi de Lenz  $E$  est de sens contraire au courant  $I$  (on lui donne parfois le nom de "force contre-électromotrice", f.c.é.m.).

Si  $R$  est la résistance de l'enroulement d'induit, la loi d'Ohm s'écrit:

$$U = R I + E$$

La puissance électrique  $U I$  fournie par le générateur au moteur est la somme de deux termes:

$$U I = R I^2 + E I$$

où:  $R I^2$  = les pertes par effet Joule dans l'enroulement de l'induit;  
 $P_e = E I$  = la puissance, dite électromagnétique.

Cette puissance peut être exprimée sous forme:

$$P_e = E I = (p/a) (N\Phi n) I$$

et transformée comme:

$$P_e = E I = (1/2\pi) (p/a) (N\Phi I) 2\pi n$$

soit

$$P_e = T (2\pi n)$$

La puissance électromagnétique, égale au produit du couple électromagnétique  $T$  par la vitesse angulaire de rotation  $2\pi n$ , passe **intégralement** de la forme électrique  $E I$  à la forme mécanique  $T (2\pi n)$ .

$$E I \Rightarrow \text{moteur} \Rightarrow T (2\pi n)$$

Mais la puissance mécanique  $T (2\pi n)$  n'est pas entièrement disponible sur l'arbre du moteur:

- des pertes magnétiques  $P_{mag}$  (dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault) se produisent dans les tôles du rotor par suite de leur déplacement devant les pôles du stator;
- des pertes mécaniques  $P_{méc}$  ont lieu au niveau des paliers soutenant l'arbre du moteur.

La puissance utile  $P_u$ , c'est-à-dire la puissance dont on dispose sur l'arbre, est la différence

$$P_u = P_e - (P_{mag} + P_{méc})$$

Il en résulte que le couple utile  $T_u$  appliqué par le moteur à la machine qu'il entraîne, est légèrement inférieur au couple électromagnétique  $T$

$$T_u (2\pi n) = T (2\pi n) - (P_{mag} + P_{méc})$$

$$T_u = T - (P_{mag} + P_{méc}) / (2\pi n)$$

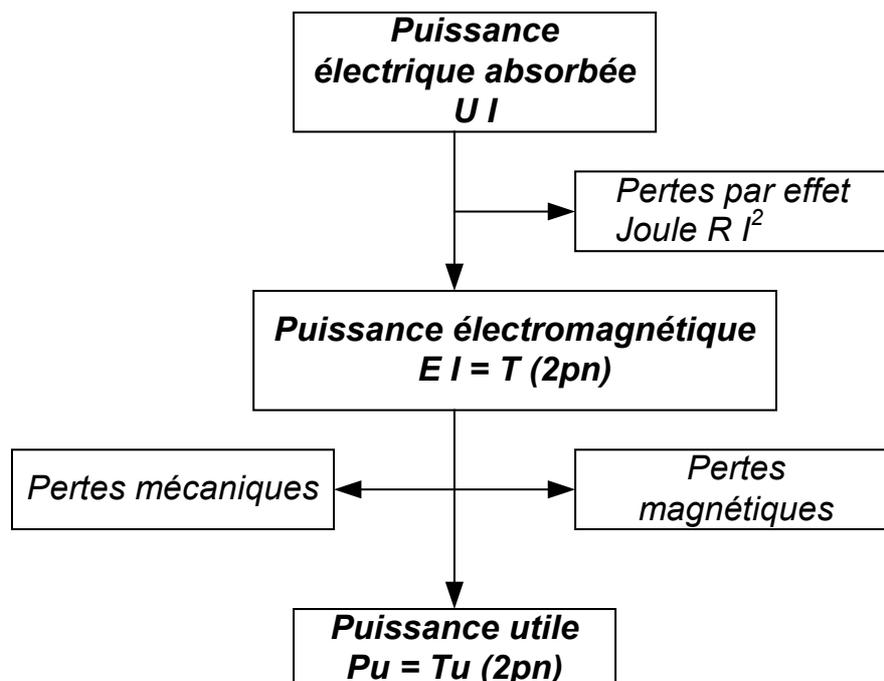
La différence entre  $T$  et  $T_u$  est appelé **couple de pertes**  $T_p$

$$T_u = T - T_p$$

En conclusion, l'ensemble tourne à la vitesse de rotation  $n$  telle que

$$T_u = T_r$$

Le bilan de puissance du moteur à courant continu peut alors être représenté par le tableau suivant:



Il faut remarquer que le couple  $T_p$  est généralement très inférieur à  $T$  et l'on confond souvent le couple électromagnétique  $T = (1/2\pi) (p/a) N\Phi I$  avec le couple utile  $T_u$ .

### b) Fonctionnement en dynamo :

Si un moteur auxiliaire est accouplé à la machine à courant continu et exerce sur son arbre un couple moteur  $T_m$  : l'ensemble tourne à la fréquence  $n$  si bien qu'une f.é.m.  $E$  est induite dans le rotor.

Si l'enroulement d'induit est fermé sur un circuit extérieur le courant  $I$  circule dans le sens de  $E$ ; la tension qui apparaît entre les bornes de l'induit est :

$$U = E - R I$$

Une partie de la puissance  $T_m (2\pi n)$  est consommée par suite des pertes mécaniques  $P_{méc}$  et des pertes magnétiques  $P_{mag}$ ; le reste, c'est-à-dire la puissance électromagnétique  $P_e$  qui est :

$$P_e = T_m (2\pi n) - (P_{mag} + P_{méc}) = T (2\pi n)$$

passé de la forme mécanique  $T (2\pi n)$  à la forme électrique  $E I$

$$P_e = T (2\pi n) = E I$$

La machine fonctionne en générateur

$$T (2\pi n) \Rightarrow \text{générateur} \Rightarrow E I$$

Le bilan de puissance établi précédemment est valable pour le fonctionnement en générateur à condition de le lire de bas en haut et de remplacer  $T_u$  par  $T_m$ .

## V.3. Caractéristiques des moteurs électriques

### V.3.1. Importance de la caractéristique mécanique

#### a) Définition

On appelle caractéristique mécanique d'une machine la courbe qui exprime le moment du couple sur l'arbre en fonction de la vitesse.

Cette caractéristique est particulièrement importante car, comme elle ne fait intervenir que des grandeurs mécaniques (le couple et la vitesse), elle est commune à toutes les machines, que ce soit des moteurs ou des appareils entraînés. Dans le premier cas, il s'agit du couple moteur  $T_m$  en fonction de la vitesse, soit  $T_m = f(n)$ . Dans le deuxième cas, c'est le couple résistant  $T_r$  en fonction de la vitesse, soit  $T_r = f(n)$ . En effet, quand on veut étudier les propriétés d'un moteur électrique, on ne peut pas faire abstraction de la machine qu'il aura à entraîner.

### b) Fonctionnement d'un ensemble moteur - machine entraînée

#### • Point de fonctionnement

On détermine le point de fonctionnement  $M$  du groupe en représentant sur un même diagramme les caractéristiques mécaniques du moteur et de la machine qu'il entraîne. Au point d'intersection de ces deux caractéristiques, on a :

$$T_m = T_r$$

A ce point correspondent habituellement le couple nominal ( $T_n$ ) et la vitesse nominale ( $n_n$ ) du groupe. Ces grandeurs nominales d'un moteur électrique (tension, puissance, vitesse) sont inscrites sur la plaque signalétique, l'intensité nominale correspondant à l'intensité la plus élevée que peut supporter ce moteur en régime permanent sans échauffement excessif.

#### • Stabilité

Il est intéressant de rechercher à quelle condition le fonctionnement de cet ensemble est stable. A cet effet, supposons que pour une cause extérieure ce groupe ralentisse, il y a deux possibilités :

- Dans le premier cas, le ralentissement du groupe correspond à une augmentation du couple moteur qui devient supérieur au couple résistant (a). Dans ces conditions, à la première cause de nature externe s'oppose une cause interne qui tend à ramener le groupe à sa vitesse initiale.
- Dans le deuxième cas (b), le ralentissement du groupe provoque une augmentation du couple résistant par rapport au couple moteur, ce qui a pour effet d'accroître le déséquilibre et d'entraîner ainsi l'arrêt du groupe.

Le même raisonnement peut s'appliquer à une cause extérieure qui tend à augmenter la vitesse du groupe. Dans le premier cas, la réaction interne tend à rétablir la vitesse initiale alors que, dans le deuxième cas, elle tend à accentuer l'écart, ce qui a pour effet de provoquer l'emballement du groupe.

On peut traduire mathématiquement la condition de stabilité en écrivant que la pente de la caractéristique  $T_m - T_r$  doit être négative, soit :

$$\Delta(T_m - T_r) / \Delta N < 0$$

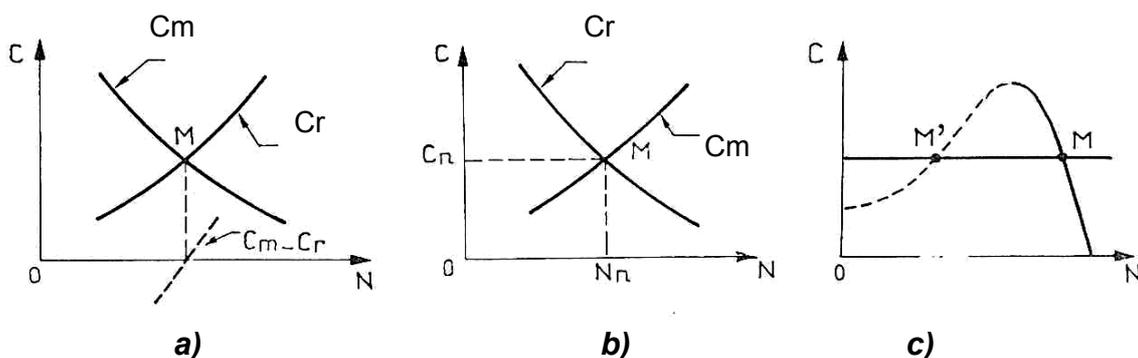


Fig. 5.2

Ce résultat s'applique à un moteur quelconque (continu ou alternatif). En effet, si l'on considère l'ensemble formé par un moteur asynchrone et la machine à couple constant qu'il entraîne (c), on constate qu'il y a deux points de fonctionnement possibles M et M'. De ces deux points, seul M est stable; c'est ainsi que l'on peut représenter en trait plein le domaine stable de la caractéristique.

### c) Démarrage de l'ensemble moteur – machine entraînée

La connaissance des caractéristiques mécaniques du moteur et de la machine entraînée est nécessaire pour la détermination du temps du démarrage de cet ensemble. En effet, on a:

$$T_m - T_r = K \, d\Omega/dt$$

Où K désigne le moment d'inertie de la partie tournante.

La connaissance du temps du démarrage d'un groupe est important car, si ce temps est trop long, il peut en résulter un échauffement excessif du moteur qui peut provoquer sa destruction. Pour éviter cet inconvénient, on doit utiliser un moteur de plus fortes dimensions.

### d) Caractéristiques mécaniques des machines entraînées

La caractéristique mécanique d'une machine entraînée est en général complexe. Toutefois celle-ci peut avoir une expression mathématique simple pour certaines applications.

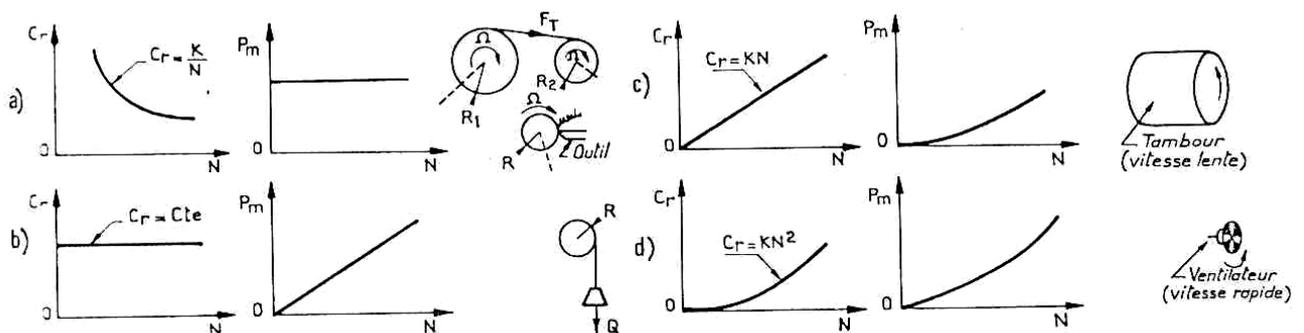


Fig. 5.3

- Couple inversement proportionnel à la vitesse (fig.5.3a) - Cet entraînement  $T_r = K/n$  se rencontre quand on déroule un produit (tôle, papier, fil, etc.) d'un premier tambour afin de l'enrouler sur un deuxième tambour. L'analyse des conditions démontre que cet entraînement fonctionne à puissance constante.
- Couple constant (fig.5.3 b) - Ce couple est indépendant de la vitesse, aussi la puissance reçue est-elle proportionnelle à la vitesse. Ce fonctionnement est applicable à la plupart des engins de levage.
- Couple proportionnel à la vitesse (fig.5.3c) - Ce type d'entraînement est peu fréquent; il concerne des machines qui tournent lentement, avec des tambours

de grandes dimensions (machines à polir, à rendre les tissus brillants, etc.), le frottement étant proportionnel à la vitesse.

- d) Couple proportionnel au carré de la vitesse (fig.5.3d) - Cet entraînement est fréquent, car il concerne les machines qui tournent vite (ventilateurs, soufflantes, etc.), le frottement étant alors proportionnel au carré de la vitesse; pour cette raison on l'appelle couple ventilateur.

### V.3.2. Caractéristiques du moteur à excitation séparée

( voir fig 5.4)

Le courant d'excitation  $J$  est maintenu constant: le moteur étant supposé bien compensé, le flux utile  $\Phi$  reste invariable quel que soit le courant  $I$  dans l'induit, c'est-à-dire quel que soit le couple résistant  $T_r$  exercé sur l'arbre. Le moteur est à **flux constant**. Nous allons considérer les trois caractéristiques suivantes correspondant à la valeur nominale de la tension  $U$ .

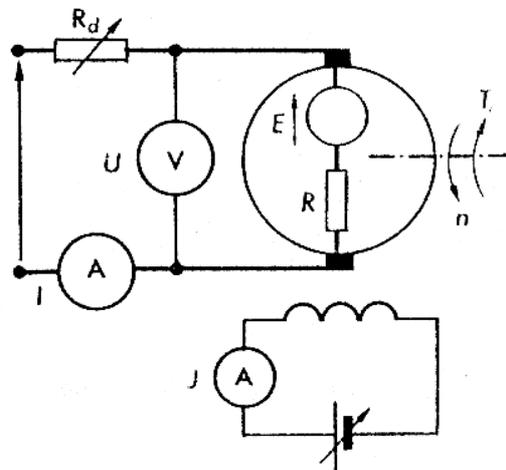


Fig. 5.4 moteur à excitation séparée

#### a) Caractéristiques de vitesse $n=f(I)$ :

D'après l'expression de la f. c.é.m en fonction de la vitesse  $n$  :  $E = \frac{p}{a} N\Phi n$

Et comme  $U = E + RI$  alors  $n = \frac{U - RI}{\frac{p}{a} N\Phi}$

- A vide :  $n_0 = \frac{U - RI_0}{\frac{p}{a} N\Phi}$

- En charge:

L'expression  $n = \frac{U - RI}{\frac{p}{a} N\Phi}$  montre que la fréquence de rotation est une fonction affine

de courant

Dans la pratique, la chute de tension  $RI$  est toujours faible devant la tension appliquée  $U$ , aussi on peut conclure:

**La caractéristique  $n = f(I)$  est une droite descendante de pente très faible.**  
(exemple voir figure 5.5)

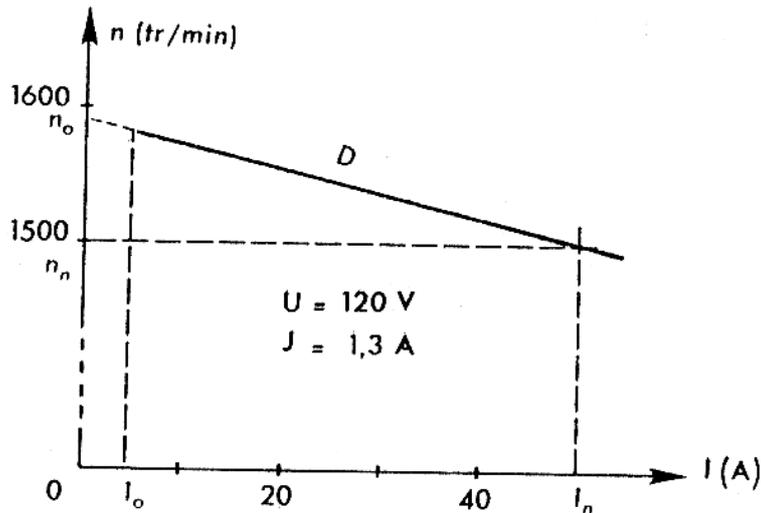


Fig 5.5

**b) Caractéristiques de couple  $T_u=f(I)$  :**

Puisque l'expression du couple électromagnétique est  $T=(1/2\pi) (p/a)N\Phi I$ , alors  $T$  est proportionnel à  $I$  (voir graphe  $D'$  fig 5.6 passant par l'origine). A cause des pertes magnétiques et mécaniques le couple utile  $T_u$  est légèrement inférieur au couple électromagnétique  $T_u = T - T_p$  où  $T_p$  est le couple des pertes avec  $T_p = (P_{mag}+P_{mec}) / (2\pi n)$

Puisque les pertes magnétiques et les pertes mécaniques sont sensiblement proportionnelles à la vitesse  $n$  (pour un courant d'excitation  $J$  donné) alors  $T_p$  est sensiblement constant. Dans ce cas  $T_u = f(I)$  se déduit du graphe  $T = f(I)$  par une translation verticale vers le bas d'une quantité égale à  $T_p$  (voir graphe  $D'_u$  fig 5.6 dont l'abscisse à l'origine est  $I_0$  absorbé à vide)

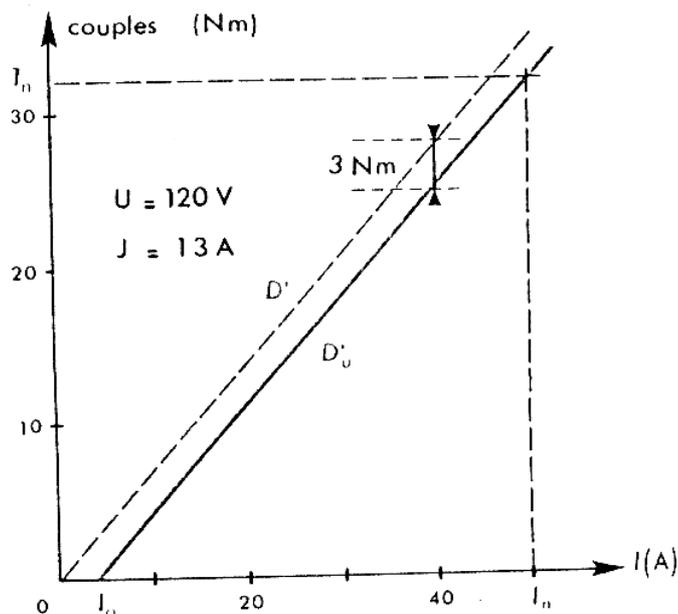


Fig 5.6

c) **Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$  :**

On détermine facilement la caractéristique mécanique, soit par élimination graphique de l'intensité entre les deux caractéristiques précédentes, soit par calcul.

En effet, par calcul, on a:

$$T = (1/2\pi) (p/a) N \Phi I$$

et

$$I = (U - E) / R \quad \Rightarrow \quad I = (1/R) (U - p/a N \Phi n)$$

d'où:

$$T = (1/2\pi) (p/a) N \Phi (1/R) (U - p/a N \Phi n)$$

A vide, lorsque  $T = T_r = 0$ ,  $n$  prend une valeur  $n_0$  telle que

$$U - p/a N \Phi n_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad n_0 = U / (p/a N \Phi)$$

Lorsque  $T_r$  augmente,  $n$  diminue faiblement à partir de  $n_0$  (voir graphe  $D''$  fig 5.7). Le couple utile  $T_u$  étant lié à  $T$  par la relation:

$$T_u = T - T_p$$

**La caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$  ( voir graphe  $D''u$  fig 5.7) est une droite faiblement inclinée par rapport à la verticale, dont l'abscisse à l'origine est  $n(l_0) \approx n_0$ .**

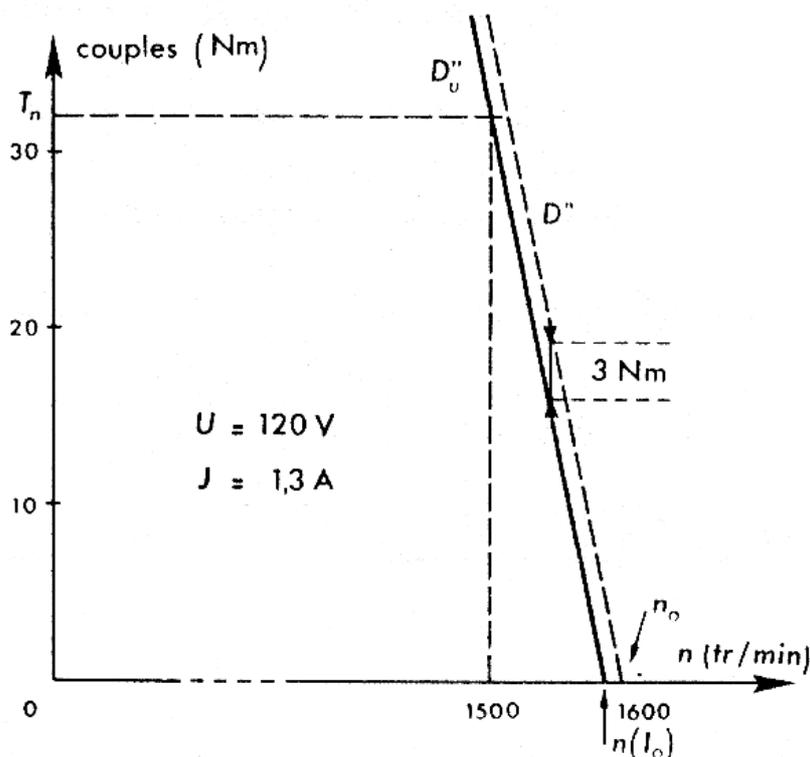


Fig 5.7

### V.3.3. Caractéristiques du moteur à excitation shunt

Les caractéristiques de ce moteur sont les mêmes que celle d'un moteur à excitation séparée puisque le flux  $\Phi$  est maintenu constant comme la tension  $U$ .

### V.3.4. Caractéristiques du moteur série :

( voir fig 5.8)

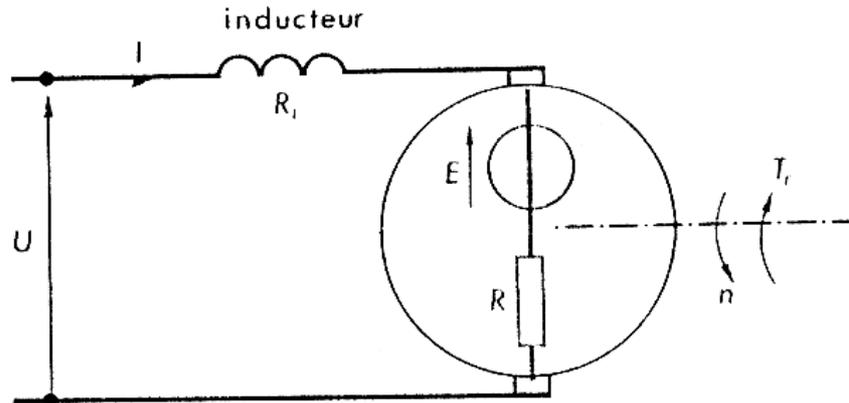


Fig. 5.8 moteur série

#### a) Caractéristique de vitesse $n = f(I)$

La fréquence de rotation a pour expression : 
$$n = \frac{U - (R + R_i) I}{\frac{p}{a} N \Phi}$$

Mais le flux  $\Phi$  n'est pas constant c'est une fonction de  $I$

- Supposons le circuit magnétique non saturé dans ce cas :  $\Phi = k \times I$  avec  $k = \text{constante}$

alors  $n = f(I) = \frac{U - (R + R_i) I}{\left(\frac{p}{a} N K\right) I}$  c'est une branche d'hyperbole ( voir fig 5.9)

- En réalité il faut apporter deux corrections à la fonction précédente :

1. Aux faibles charges ( $I \ll I_n$ ), le flux rémanent du circuit magnétique s'ajoute à  $kI$ . Dans ce cas pour la même valeur de  $I$   $n$  est plus faible que celle indiquée par l'hyperbole ( voir fig 5.9)
2. Lorsque la charge augmente le circuit magnétique se sature, le flux  $\Phi$  croît moins vite que  $kI$ . Dans ce cas pour la même valeur de  $I$   $n$  est légèrement supérieure à celle indiquée par l'hyperbole ( voir fig 5.9)

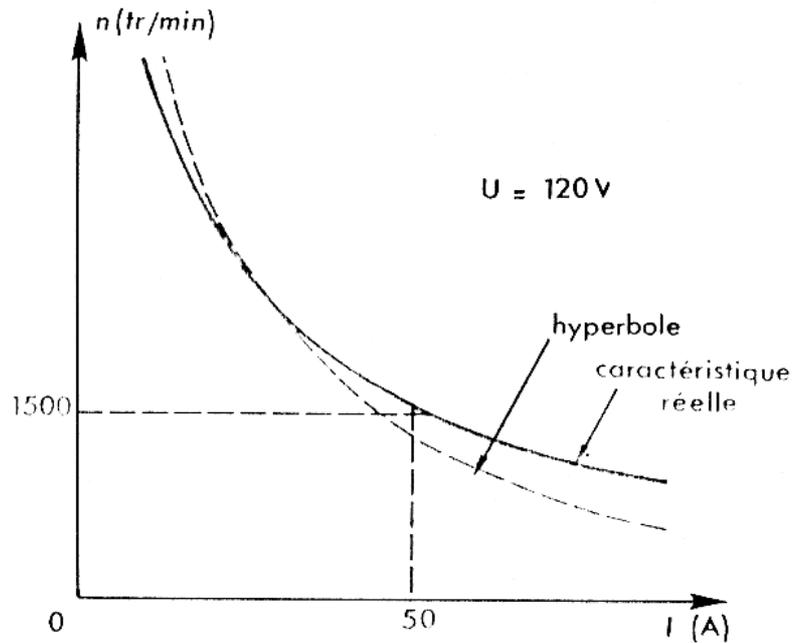


Fig. 5.9

**b) Caractéristiques de couple  $T_u=f(I)$  :**

L'expression du couple électromagnétique est  $T = (1/2\pi) (p/a) N\Phi I$

le flux  $\Phi$  est une fonction de  $I$

- Aux faibles charges ( $I \ll I_n$ ) : on a  $\Phi = k \times I$  donc  $T = (1/2\pi) (p/a) Nk I^2$   
 **$T = f(I)$  est une parabole** (voir fig5.10)
- Lorsque le circuit magnétique se sature le flux  $\Phi$  croît moins vite que  $kI$ . Dans ce cas  $T = f(I)$  s'écarte progressivement de la parabole précédente (voir fig5.10)

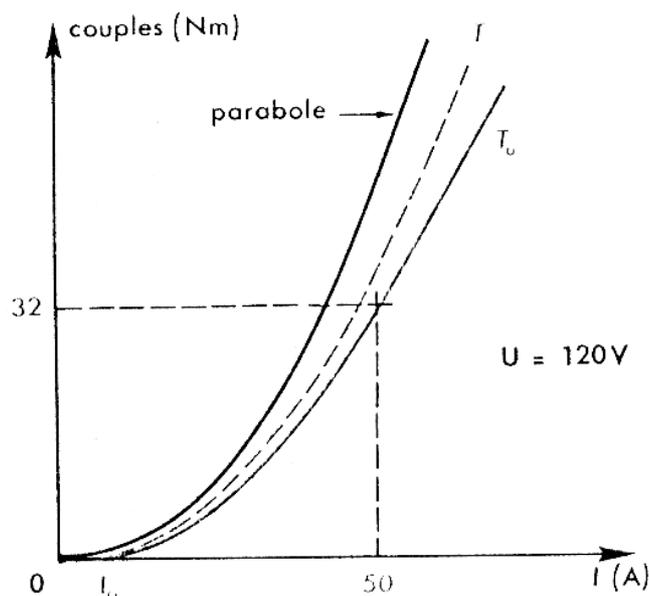


Fig. 5.10

Le couple utile  $T_u$  étant lié à  $T$  par la relation :  $T_u = T - T_p$ . Donc la caractéristique  $T_u = f(I)$  se situe au dessous de  $T = f(I)$  (voir fig5.10)

L'abscisse à l'origine  $I_0$  est le courant qui serait appelé à vide lorsque  $T_u = 0$ . Il s'agit ici d'un courant fictif correspondant à une valeur de  $n$  non supportable par le moteur.

### c) Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$ :

En charge : Lorsque le couple  $T_r$  augmente le courant  $I$  appelé croît et la fréquence de rotation  $n$  décroît.

En éliminant  $I$  entre les deux caractéristiques précédentes on peut obtenir graphiquement la caractéristique mécanique (voir fig 5.11)

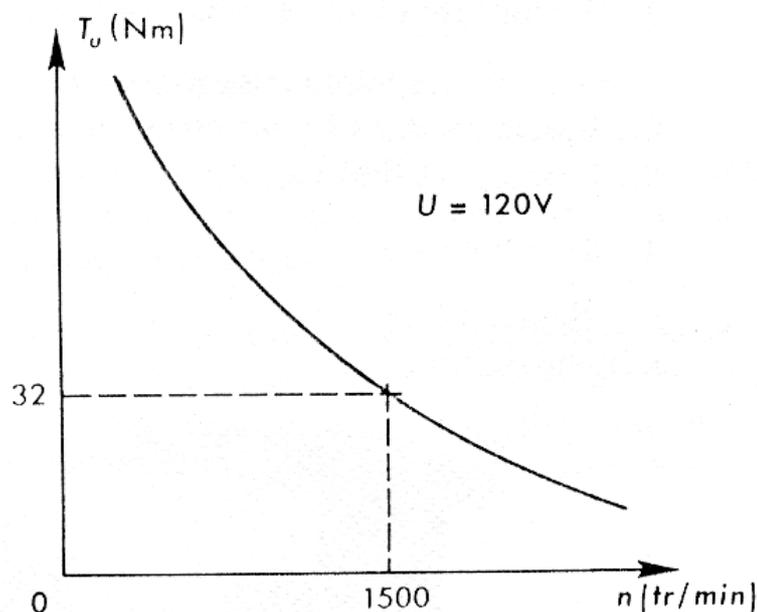


Fig. 5.11

$T_u$  diminue lorsque  $n$  augmente: le couple utile est sensiblement inversement proportionnel à la fréquence de rotation:

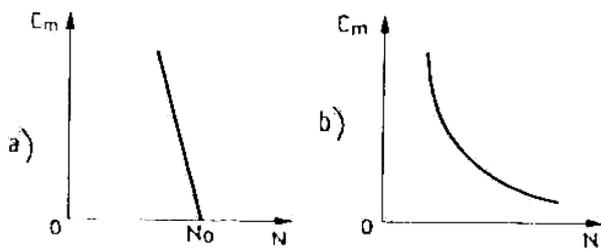
$$T_u \approx K / n \quad \text{avec} \quad K = C^{te}$$

A vide lorsque  $T_r = 0 \Rightarrow T_u = 0$ : on observe alors sur la caractéristique du couple  $T_u = f(I)$  que  $I = I_0 \ll I_n$ . La caractéristique de vitesse  $n = f(I)$  montre que la valeur de  $n$  qui correspondrait à  $I_0$  serait **très supérieure** à  $n_n$ : il s'agit d'une fréquence de rotation que le moteur ne peut pas supporter: **Le moteur série s'emballe à vide.**

### V.4. Choix d'un moteur à courant continu - caractéristiques mécaniques

Pour faciliter le choix d'un moteur électrique en vue d'un entraînement donné, on distingue les deux types suivants:

- la caractéristique shunt - si la vitesse du moteur varie peu avec la charge (fig 5.12a);
- la caractéristique série - si la vitesse du moteur varie beaucoup avec la charge (fig.5.12b).



a) shunt;

b) série

Fig. 5.12. Caractéristiques mécaniques

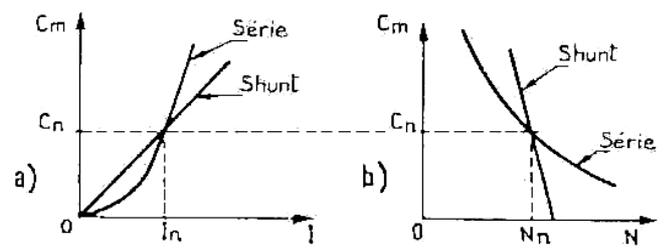


Fig. 5.13. Caractéristiques mécaniques de comparaison

Afin d'analyser les propriétés de ces deux types de caractéristiques, il est intéressant de comparer les comportements de deux moteurs (fig.5.13), shunt et série, de mêmes valeurs nominales quand ils doivent faire face à une brusque augmentation du couple résistant. Sur la figure où sont présentées les caractéristiques mécaniques des deux moteurs, les points d'intersection donnent les valeurs nominales de chacun des moteurs.

Supposons que pour un démarrage à pleine charge nécessitant une forte accélération (démarrage d'un véhicule) on ait besoin d'un couple double du couple nominal, on constate que le moteur série le fournit avec un courant plus faible que le moteur shunt, mais en revanche sa vitesse a diminué davantage. Si cette variation de vitesse n'est pas gênante (traction, engins de levage, etc.) la caractéristique série convient parfaitement, dans le cas contraire (tours, raboteuses, fraiseuses, etc.), il faut utiliser la caractéristique shunt.

## **VI. Performances des moteurs**

Nous avons montré, qu'en raison même de l'allure de la caractéristique d'un moteur (allure shunt ou série), celui-ci était en mesure d'adapter sa vitesse à l'effort demandé. En dehors de cette adaptation automatique, qui est bonne ou mauvaise suivant les applications, on peut souhaiter modifier volontairement la vitesse du moteur.

C'est ainsi que la vitesse de la broche d'un tour doit être fixée en fonction du diamètre de la pièce que l'on veut usiner. Dans d'autres applications comme la traction, il ne suffit pas de pouvoir faire varier la vitesse, il faut également pouvoir réaliser des démarrages et des freinages satisfaisants du moteur. Enfin dans d'autres cas comme les laminoires, c'est l'inversion rapide du sens de marche qui est prépondérante.

C'est pour avoir les éléments de choix d'un moteur pour une application donnée que l'on étudie ses performances dans les domaines suivants: démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion du sens de marche.

### **VI.1. Moteur shunt**

#### **VI.1.1. Démarrage**

##### **a) Problèmes du démarrage :**

Pour assurer le démarrage d'un moteur, on doit se poser les deux questions suivantes:

- Le couple moteur est-il suffisant pour vaincre le couple résistant?
- L'intensité appelée au moment du démarrage n'est-elle pas trop élevée?

Le problème du couple suffisant au démarrage est toujours résolu avec le moteur shunt, on est simplement amené à limiter la valeur du courant appelé. Si l'on ne prend pas de précaution spéciale en appliquant la tension nominale à un moteur au repos, l'appel de courant  $I_d$  est forcément très élevé, car le moteur étant arrêté, sa f.c.é.m. est nulle.

En effet, si l'on admet que la chute de tension en charge est de deux pour cent, on a:

$$R_a I_n \approx U / 50 \text{ et } R_0 I_0 = U, \text{ soit: } I_0 / I_n \approx 50$$

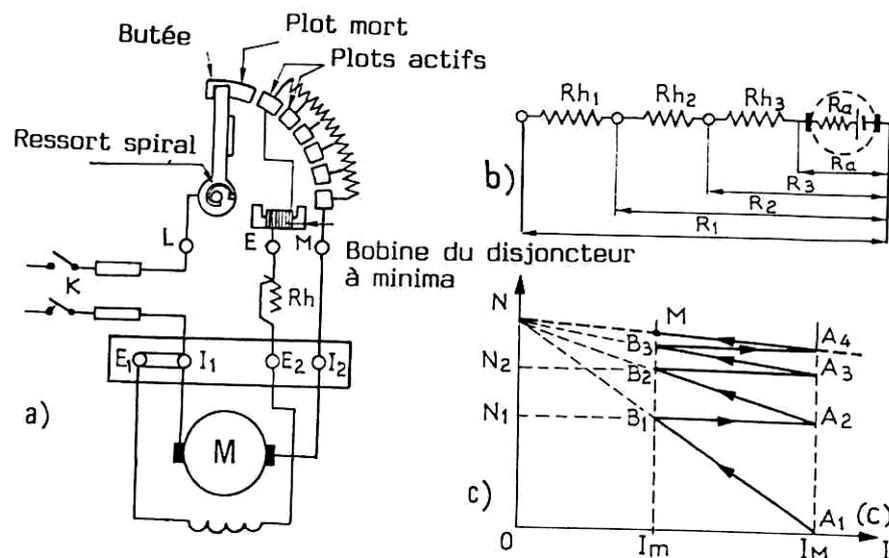
Une telle surintensité entraînerait la destruction de l'induit. Pour la limiter, on pourrait réduire la tension d'alimentation. Malheureusement, cette solution, qui est utilisée dans le groupe Léonard, n'est pas possible si la tension d'alimentation est fixe. Dans ce cas on est obligé d'utiliser un rhéostat de démarrage.

##### **b) Branchement du rhéostat de démarrage**

Le branchement d'un rhéostat de démarrage (fig. 6.1) doit être effectué avec certaines précautions. Le rhéostat porte trois bornes désignées par les lettres L, E, M.

Pour alimenter l'inducteur, il suffit de relier  $E_1$  à  $I_1$  au moyen d'une barrette sur la plaque à bornes, puis de relier  $E_2$  à  $E$ , car la connexion intérieure au rhéostat met  $E$  en liaison avec le premier plot; le moteur est ainsi excité dès que la manette prend contact avec ce plot, c'est-à-dire avant le démarrage.

Le moteur est mis en route en manœuvrant la manette, celle-ci étant maintenue sur le dernier plot par l'attraction d'un électro-aimant inséré dans le circuit de l'inducteur. Pour arrêter le moteur, il suffit d'ouvrir l'interrupteur  $K$ ; le courant étant coupé dans l'induit et dans l'inducteur, la manette est rappelée par un ressort spiral sur le plot mort, ce qui remet le rhéostat dans les conditions de démarrage.



Démarrage manuel avec un rhéostat de démarrage : a) Schéma principal ; b) Schéma des résistances du rhéostat de démarrage ; c) Caractéristiques de démarrage

Fig. 6.1

Il est important de signaler le fait suivant:

- **Un moteur shunt dont l'excitation est coupée s'emballe.**

En effet, en marche normale, on a:

$$U = E' + R_a I_a \approx E' = p/a n N \Phi, \quad \text{puisque } R_a I_a \text{ est faible}$$

d'où:

$$n \text{ est inversement proportionnelle à } \Phi \quad \text{si } \Phi \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$$

C'est pour éviter cet inconvénient grave en cas de rupture accidentelle du circuit d'excitation, que l'électro-aimant est alimenté par l'intermédiaire du circuit d'excitation. Enfin, il est important de noter:

- **L'excitation du moteur shunt doit être maximale au démarrage.**

En effet, comme le couple est proportionnel au courant de l'induit et au flux inducteur, on aura un appel de courant plus faible si le flux est maximal. C'est

pourquoi, avant le démarrage, on doit s'assurer que le rhéostat de champ est en court-circuit.

Il est important de noter que, pour réaliser de bonnes conditions de démarrage d'un ensemble moteur et machine entraînée, il est nécessaire de déterminer les durées de démarrage sur les différents plots en tenant compte de la caractéristique de la machine entraînée.

La protection du moteur contre tout échauffement excessif est assurée par un relais thermique qui se présente sous la forme d'un bilame.

Le démarrage d'un moteur peut s'effectuer manuellement ou semi-automatiquement. Le schéma du démarrage semi-automatique, comporte des contacteurs et des relais électromagnétiques. Il faut noter que dans l'industrie, on a tendance à remplacer de plus en plus les relais électromagnétiques par des relais statiques (électroniques). Ils présentent des avantages suivants: les armoires de commande sont avec dimensions réduites, le fonctionnement est moins bruyant, les coûts d'installation sont moins élevés, etc.

### **VI.1.2. Variation de la vitesse**

Le moteur shunt a, sur les moteurs à courant alternatif, l'avantage d'être très souple car on dispose de plusieurs procédés pour faire varier sa vitesse.

Si on retourne à l'expression générale de la vitesse, on a:

$$n = (U - RI) / k \Phi \quad \text{avec: } R = R_a + R_h$$

Dans ces conditions on constate qu'il y a trois paramètres ( $R_h$ ,  $\Phi$ ,  $U$ ) qui peuvent être réglés. Cela donne trois possibilités suivantes :

#### **a) Réglage rhéostatique**

Comme le flux  $\Phi$  est constant, car on a toujours intérêt à faire fonctionner le moteur avec le flux maximal qu'il peut délivrer, on a:

$$n = (U - RI) / k \Phi = k' (U - RI) \quad T = K_1 \Phi I = K_1'' I$$

Ainsi les caractéristiques  $n(I)$  représentent à une échelle convenable les caractéristiques  $n(T)$ . Il est facile de l'obtenir en représentant les intersections avec les axes de coordonnées (fig.6.2a), soit:

$$\text{Pour } T = 0, I = 0, n = k' U; \quad \text{pour } n = 0, I = U/R, T = K_1'' U/R$$

Ce type de réglage a l'avantage d'être simple à réaliser, mais représente de graves inconvénients aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique. En effet, du point de vue technique, on constate que les caractéristiques sont de plus en plus tombantes.

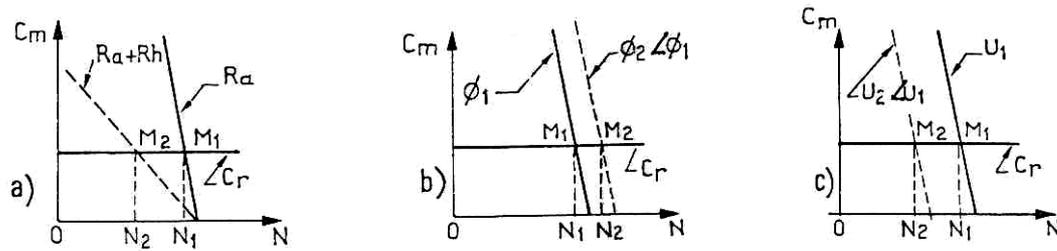


Fig. 6.2

Il résulte que, pour une charge entraînée à couple résistant constant la chute de vitesse dépend de l'importance de la charge. On traduit ce résultat en disant que la caractéristique qui était shunt, prend alors une allure série. Sur le plan technique, nous retiendrons le résultat suivant:

**Un bon réglage de vitesse doit provoquer le déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine.**

Par ailleurs, ce réglage est également mauvais sur plan économique car la consommation d'énergie dans le rhéostat est d'autant plus importante que la chute de vitesse réclamée est plus élevée. C'est ainsi qu'à la demi-vitesse, le rhéostat consomme autant d'énergie que le moteur.

En conséquence, ce réglage n'est pas utilisé dans la pratique pour le fonctionnement en régime permanent, toutefois il demeure intéressant pour les régimes transitoires comme le démarrage et le freinage.

### b) Réglage par le flux

Le démarrage d'un moteur shunt doit toujours être assuré avec le flux maximal (ou flux nominal) et la vitesse normale du moteur étant atteinte quand la tension nominale est appliquée aux bornes de l'induit.

Dans ces conditions, on n'a pas la possibilité d'augmenter le flux, on peut seulement le réduire en diminuant le courant  $J$  d'excitation par l'intermédiaire d'un rhéostat de champ. Si l'on se réfère à la relation de base, on constate que la diminution du flux a pour effet d'augmenter la vitesse (fig. 6.2b).

Il est alors évident qu'on n'a pas intérêt à réduire simultanément le flux et la tension car les deux effets sont opposés. C'est pourquoi le réglage du flux aura toujours lieu avec le rhéostat d'induit en court-circuit.

Comme la chute de tension dans l'induit est faible, soit quelques pour cent de la tension d'induit, on a:

$$n \approx U / k \Phi$$

Dans ces conditions, la caractéristique se déplace sensiblement parallèlement à l'axe des couples. Ce mode de réglage est donc très satisfaisant du point de vue technique. Il est également bon du point de vue économique car la puissance

dissipée dans l'inducteur est faible par rapport à la puissance absorbée et le rendement du moteur ne sera sensiblement modifié.

En dehors de ces avantages, il faut noter deux inconvénients:

- Avec ce procédé on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale;
- Si le couple résistant est constant ( $T = K_1 \Phi I = T_r = C^{te}$ ), l'intensité augmentera quand on diminuera le flux et le moteur risquera de chauffer.

Le deuxième inconvénient n'a pas lieu si l'entraînement est à puissance constante ( $P = U I = C^{te}$ ). Pour une tension constante le courant reste constant.

En conséquence, avant d'utiliser ce mode de réglage, il faut s'assurer que le moteur est en mesure de supporter mécaniquement la vitesse maximale et que la température de son induit ne risque pas de dépasser la valeur admissible. Pour ces deux raisons, la plage de réglage reste assez limitée (soit de un à trois fois la vitesse nominale).

### **c) Réglage par la tension**

On règle le flux à sa valeur maximale en mettant en court-circuit le rhéostat de champ afin que le courant absorbé par l'induit soit minimal. Ainsi obtient-on la caractéristique à tension nominale (fig.6.2 c). L'excitation n'étant pas modifiée, si l'on applique à l'induit des tensions de plus en plus faibles, on obtient une famille de caractéristiques parallèles.

Ce mode de réglage, qui permet de réduire à volonté la vitesse d'un groupe (moteur et machine entraînée), est excellent d'une part du point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées (elles conservent leur allure shunt), d'autre part le rendement demeure élevé à toutes vitesses.

Le seul inconvénient de ce procédé idéal est la nécessité d'une tension continue réglable. Pour produire cette tension, on utilise soit un convertisseur mécanique, soit un convertisseur électronique.

## **VI.1.3. Freinage**

Dans les nombreuses applications (traction, engins de levage, etc.) le problème du freinage est important. Certes, on peut toujours faire appel à des systèmes mécaniques, mais ceux-ci sont généralement complexes et les organes de freinage (patins, etc.) s'usent rapidement.

C'est pourquoi, on préfère utiliser une solution électrique qui consiste à transformer en énergie électrique l'énergie cinétique du moteur et de la machine entraînée. Le moteur étant alors transformé en génératrice, le couple électromagnétique de la machine est un couple résistant de freinage.

Suivant la façon dont on utilise l'énergie électrique de freinage, on distingue les trois types de freinage suivants: