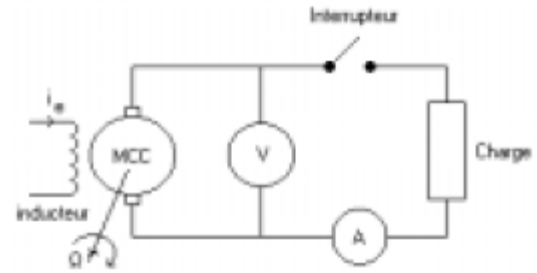


## 7. Caractéristique à vide $E_v=f(\Phi)$ à $\Omega_r$ constante– Réaction magnétique d'induit

### 7.1. Relevé expérimental.

On réalise le montage suivant:

La machine à courant continu est entraînée par une autre machine. On relève la tension à ses bornes quand l'interrupteur est ouvert (essai à vide) et quand il est fermé (essai en charge).



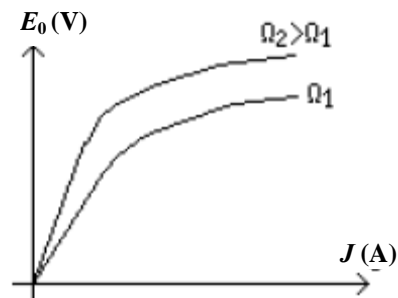
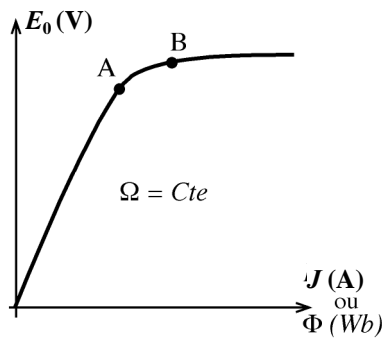
### 7.2. Essai à vide.

Quand l'interrupteur est ouvert, la machine ne débite aucun courant. On relève la tension pour plusieurs valeurs du courant d'excitation  $J_e$ , injecté dans l'inducteur. On trouve la courbe suivante:

- De O à A, la caractéristique est linéaire,  $E=K' \Phi$  (avec  $K'=K\Omega$ ).
  - De A à B le matériau ferromagnétique dont est constitué le moteur commence à saturer. ( $\mu_r$  n'est plus constant).
  - Après B, le matériau est saturé, le f.é.m. n'augmente plus.
  - La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage du point A.
- Sous le point A, la machine est sous utilisée, et après le point B les possibilités de la machine n'augmentent plus (mais les pertes augmentent puisque  $J$  augmente).
- Dans la réalité, du fait du matériau ferromagnétique, on relève une caractéristique avec une faible hystérésis.

Cette courbe est appelée caractéristique à vide. Elle correspond à une vitesse de rotation donnée. Pour un  $J$  fixé, une augmentation de la vitesse de rotation entraînera une augmentation de  $E_0$ .

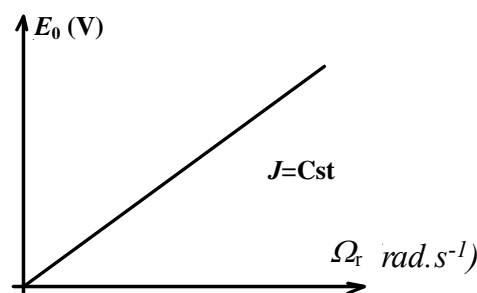
On a donc :  $E_0 = K \cdot \Phi(J) \cdot \Omega$



### 7.3. Caractéristique $E_0=f(\Omega_r)$ à $\Phi$ constant

$$E=K' \Omega$$

**Remarque :** la caractéristique est linéaire tant que la saturation n'est pas atteinte.



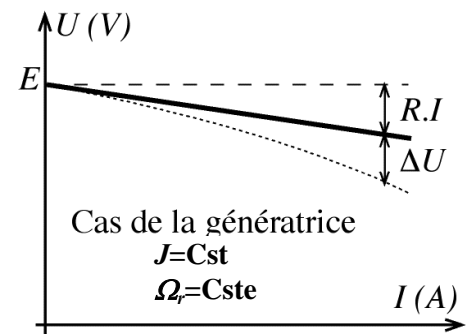
## 7.4. Caractéristique en charge

Cette fois on ferme l'interrupteur. La machine débite dans la charge (elle fonctionne en génératrice). On relève à nouveau la tension  $U$  à ses bornes en fonction de  $I$ . On trouve une courbe située sous la précédente.

- Deux phénomènes permettent d'expliquer cette différence :

- Tout d'abord, le bobinage est formé de conducteurs que l'on peut représenter par une résistance  $R$  qui provoque une légère **chute de tension ohmique** dans l'induit :  $R.I$

- Ensuite, le courant d'induit, qui résulte du déplacement du rotor sous le flux créé par l'inducteur va, lui aussi, créer un flux qui va s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Il va donc s'opposer au flux inducteur. Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire : c'est la **réaction magnétique d'induit** (RMI).



En charge, le système va donc fonctionner sous un flux inférieur à celui créé par l'inducteur ( $\Phi_{ch}(J, I) < \Phi_0(J)$ ), d'où une tension plus faible que celle attendue. La tension de sortie de la machine s'écrit alors :

$$U = K \cdot \Phi(J, I) \cdot \Omega - R.I = E_c - R.I$$

$E_c < E_0$  ( $E_0 - E_c = \varepsilon$  : Chute de tension due à la RMI)

La chute de tension totale est alors notée  $u(I) = \varepsilon + R.I = E_0 - U$

**Remarques:** -La saturation de l'induit augmente l'effet de réaction magnétique d'induit.

- Pour annuler la réaction magnétique d'induit, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit : on dit que **la machine est compensée**.

## 8. FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU.

Nous allons désormais supposer que tension et courant de sortie sont strictement continus et nous intéresser aux différentes caractéristiques électriques et mécaniques de la structure que nous venons de décrire.

### 8.1. Modèle équivalent de l'induit

#### a- Fonctionnement en Moteur

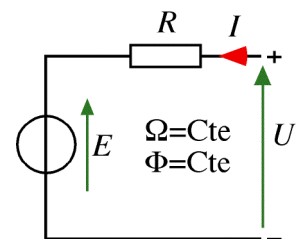
Des caractéristiques précédentes on déduit un schéma équivalent de l'induit :

$E$  : f.é.m.

$R$  : résistance du bobinage

$I$  : courant d'induit

$U$  : tension aux bornes de connexion de l'induit.

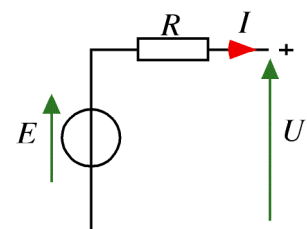


D'après la loi d'Ohms :  $U = E + RI$

#### b- Fonctionnement en Génératrice

$$U = E - RI$$

Remarquer la convention générateur du courant.



## 8.2. Modèle équivalent de l'inducteur

Le bobinage inducteur alimenté sous tension continue ne présente que sa résistance de bobinage.

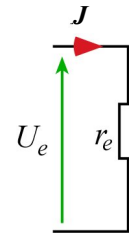
$$U_e = r_e \times J$$

$r_e$  résistance de l'enroulement inducteur ( $\Omega$ ).

$U_e$  Tension d'alimentation de l'inducteur (V).

$J$  courant dans l'inducteur (A).

(Valable uniquement dans le cas où l'inducteur est bobiné)



## 8.3. Les différentes pertes

Pertes	<u>Pertes fer</u> $P_{fer}$	<u>Pertes joules</u> $P_J$	<u>Pertes mécaniques</u> $P_{méca}$
<b>Causes</b>	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de $\Omega$ .	Pertes dans l'induit ( $R \cdot I^2$ ) et l'inducteur ( $r_e \cdot J^2$ ) dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
<b>Parades</b>	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

On définit :

### Pertes constantes

$$P_C = P_{fer} + P_{méca}$$

les pertes dites « constantes » ou « collectives ». C'est à dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes.

### Remarque

Toute relation entre des puissances peut être ramenée à une relation entre des couples. Il suffit de diviser cette première par la vitesse de rotation  $\Omega$  (en  $\text{rad.s}^{-1}$ )

### Couple de pertes $T_P$

$$T_P = \frac{P_C}{\Omega}$$

$P_C$  est proportionnel à  $\Omega$ , donc  $P_C = k\Omega$

$$\text{Donc : } T_P = \frac{P_C}{\Omega} = \frac{k\Omega}{\Omega} = k$$

le moment du couple de pertes est une caractéristique constante du moteur quelle que soit la vitesse.

## Rendement

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

## 9 METHODES D'EMPLOI DE LA MCC

Nous allons voir qu'il existe plusieurs méthodes pour alimenter l'inducteur de la machine, chacune d'entre elles conduisant à des caractéristiques de fonctionnement différentes.

- a) Excitation **séparée**: l'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale.
- b) Excitation **shunt** (ou dérivée): l'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation de l'induit.
- c) Excitation **série**: le circuit d'excitation est placé en série avec l'induit de la machine.
- d) Excitation **compound** (ou composée): c'est une combinaison des excitations shunt et série. On peut réaliser un compoundage additif (si les flux des deux enroulements s'additionnent) ou soustractif (dans le cas contraire).

Nous allons étudier les propriétés des montages les plus utilisés, en supposant que l'alimentation est constituée par une source de tension.

## 10 FONCTIONNEMENT GENERATRICE

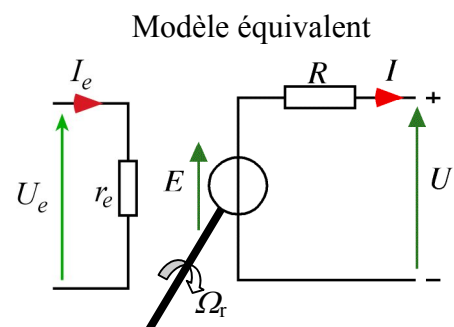
### 10.1 Génératrice à excitation indépendante

La génératrice est à **excitation indépendante** car il n'y a aucun lien électrique entre l'induit et l'inducteur.

Caractéristiques :

$$E = K\Phi\Omega$$

$$E = U + RI$$



#### 10.1.1 Caractéristique en charge (externe)

- Caractéristique  $U(I)$  à  $N_r$  et  $J$  constants

$$U = E - RI - \varepsilon$$

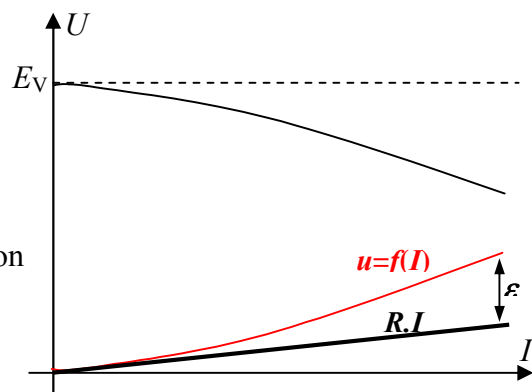
$$E - U = u = RI + \varepsilon$$

Connaissant  $R \Rightarrow \Delta U_i = R.I$

$$\Rightarrow \varepsilon = u - \Delta U_i = u - R.I$$

**Rem** : Nous pouvons aussi tenir compte de la chute de tension ohmique due au contact balais-collecteur :

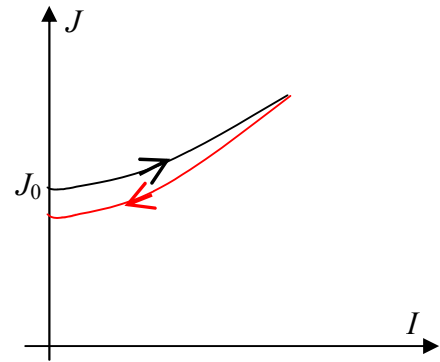
$$u = RI + e_{AB} + \varepsilon$$



### - Caractéristique de réglage $J=f(I)$ à $U$ et $N_r$ constants

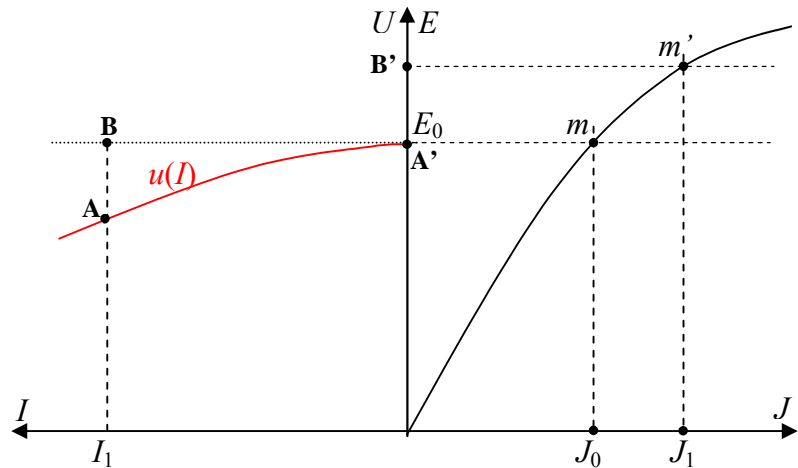
En charge, pour maintenir  $U$  constante il faut augmenter  $E_0$  qui est égale à  $U + u$  au fur et à mesure que  $I$  croît  $\Rightarrow$  agir sur le courant d'excitation  $J$  (courbe aller).

Si on refait le chemin inverse, c'est à dire diminuer  $I$  la tension  $U$  augmente  $\Rightarrow$  il faut diminuer  $J$  (courbe de retour).

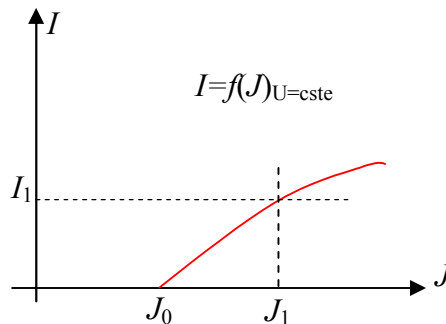


### b) Prédétermination de la caractéristique de réglage $J=f(I)$

Pour un courant  $I_1 \Rightarrow \Delta U = AB = A'B'$   
Cette chute de tension est compensée en augmentant l'excitation de  $J_0$  à  $J_1$ .



Ainsi, pour tout courant d'induit  $I_i$  on trouve  $J_i$  correspondant.

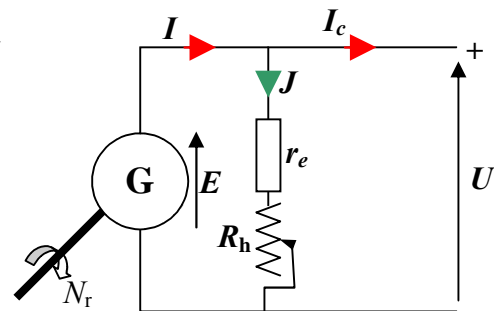


## 10.2 Génératrice à excitation dérivée (shunt ou parallèle)

C'est une génératrice auto excitée où le courant d'excitation dérive du courant d'induit.

A vide l'induit n'est parcouru que par un faible courant due au champ rémanent  $\Rightarrow J_0 = \frac{E_{rem}}{r_e}$

$J_0$  existe  $\Rightarrow E$  augmente  $\Rightarrow J$  augmente  $\Rightarrow \dots$  etc. jusqu'à la saturation de la génératrice  $\Rightarrow E=cste \Rightarrow J=cst$



**Rem :** Si la machine est neuve  $\Rightarrow E_{rem}=0 \Rightarrow$  l'exciter d'abord séparément pour avoir un champ rémanent.

### 10.2.1 Points de fonctionnement et conditions d'amorçage

Le courant d'excitation  $J$  est relié à la f.é.m à vide par deux relations :

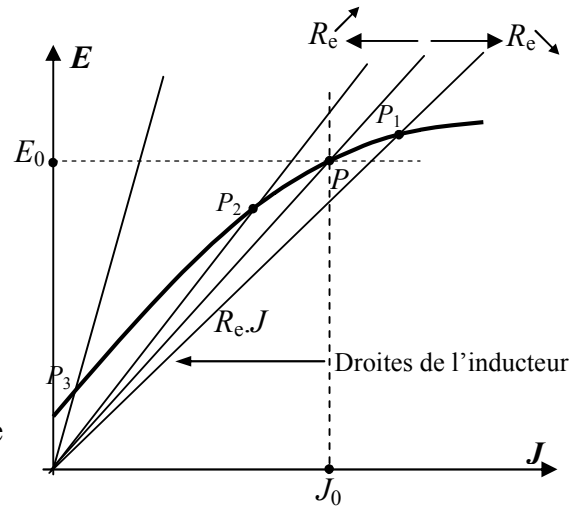
- la caractéristique à vide  $E_0 = f(J)$
- la caractéristique  $E_0 = R_e \cdot J$  ( $R_e = r_e + R_h$ )

L'intersection des deux caractéristiques donne le point de fonctionnement à vide ( $P$ ).

$R_e < \Rightarrow$  Pnt  $P_1$

$R_e > \Rightarrow$  Pnt  $P_2$

Pour  $R_e \gg (P_3)$  la génératrice ne s'amorce pas,  $E$  est voisine de  $E_{rém}$



Pour obtenir l'amorçage il faut que la charge soit déconnectée et la vitesse de rotation suffisamment grande.

### 10.2.2 Caractéristiques en charge

#### a) Caractéristique $U=f(I)$ à $N_r$ et $R_h$ constantes

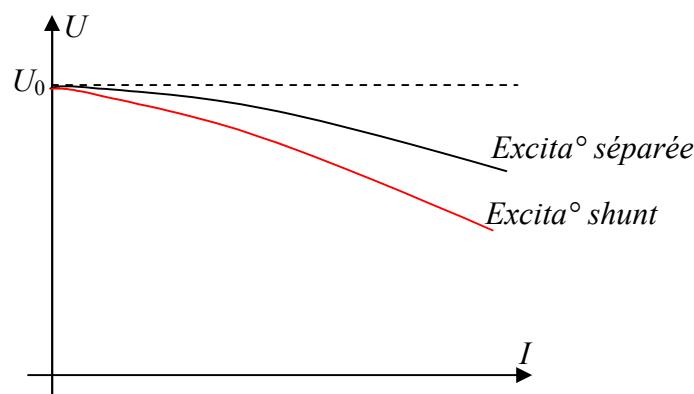
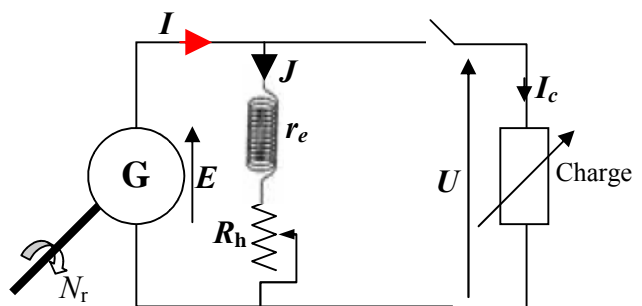
Elle permet de traduire la variation de la tension aux bornes de la G en fonction du courant de charge à vitesse et résistance du circuit d'excitation constantes. Elle peut être relevée directement par un essai en charge.

$$U = E - R \cdot I - \varepsilon = E - R \cdot (J + I_c) - \varepsilon$$

Si  $I_c$  augmente  $\Rightarrow \Delta U = R \cdot (J + I_c)$  augmente

Alors  $E$  diminue puisque  $J$  diminue, donc  $E \neq E_0$

$$\Rightarrow E_{shunt} < E_{ind}$$



## b) Caractéristique $J=f(I)$ à $N_r$ et $U$ constantes

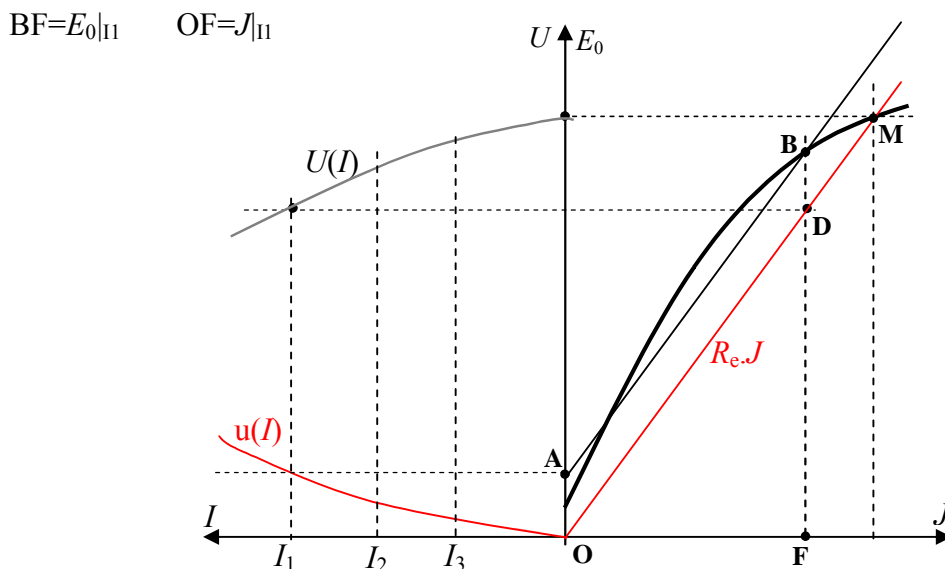
En diminuant  $R_e$ , on peut compenser par l'augmentation de  $E_0$  la chute de tension interne  $u$ . La caractéristique  $J=f(I)$ , pour les mêmes valeurs de  $N_r$  et  $U$  est la même que pour l'excitation indépendante. En effet, à  $U$  et  $I$  donnés, il faut le même  $E_0 = U + u$ , donc le même  $J$ .

### 4.2.3 Prédétermination des caractéristiques en charge

#### a) Caractéristique $U=f(I)$ à $N_r$ et $R_e$ constantes

Si on a  $E_0(J)$  et  $u(I)$ , la construction de Picou permet de tracer  $U(I)$  à résistance  $R_e$  du circuit inducteur constante.

- Tracer la caractéristique à vide  $E_0(J)$
- Tracer la caractéristique  $u(I)$
- Tracer la droite de l'inducteur  $R_e J$ ; elle coupe  $E_0(J)$  en M. Les projections de M donnent  $J$  et  $U$  quand  $u$  est nulle.
- Pour un courant  $I_1$ , on porte  $u$  correspondant en OA. Par A on mène la parallèle à la droite de l'inducteur. Cette droite a pour équation  $E_0 = R_e J + u(I_1)$ ; elle coupe  $E_0(J)$  en B.



On soustrait  $u$  de  $E_0$ . Pour cela il suffit de descendre verticalement de B jusqu'en D sur la droite de l'inducteur; on lit en FD la tension  $U$ .

On reporte  $U$  au droit de  $I_1$  dans le quadrant de gauche. A l'aide de quelques points on obtient ainsi  $U(I)$ .

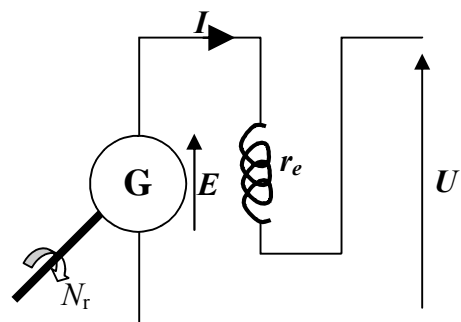
#### b) Prédétermination de la caractéristique $J=f(I)$ , à $U$ et $N_r$ constantes

On construit  $J=f(I)$  à partir de  $E_0(J)$  et  $u(I)$  exactement comme pour une génératrice à excitation séparée.

### 10.3 Génératrice à excitation série

L'enroulement inducteur est monté en série avec l'induit. Etant traversé par un fort courant, le bobinage inducteur sera fait avec du gros fil et aura un nombre de spires réduit, contrairement aux autres modes d'excitations.

A vide ( $I=0$ ) la GCC ne peut donner que quelques volts dus au rémanent puisque l'excitation est due au courant de charge  $I$ .

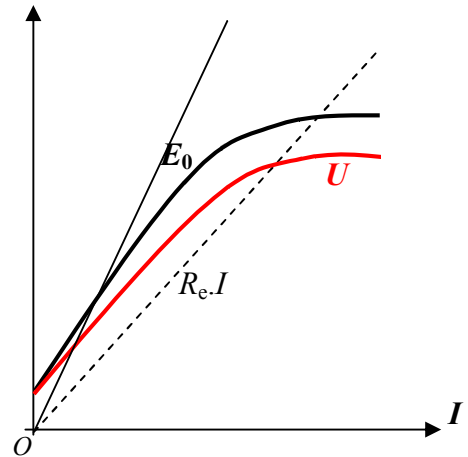


### a) Caractéristique en charge

La caractéristique  $U(I)$  à  $N_r$  constante a l'allure suivante :

On voit que cette génératrice ne peut être utilisée comme une source de tension constante, puisque  $U$  est sensiblement proportionnelle à  $I$ .

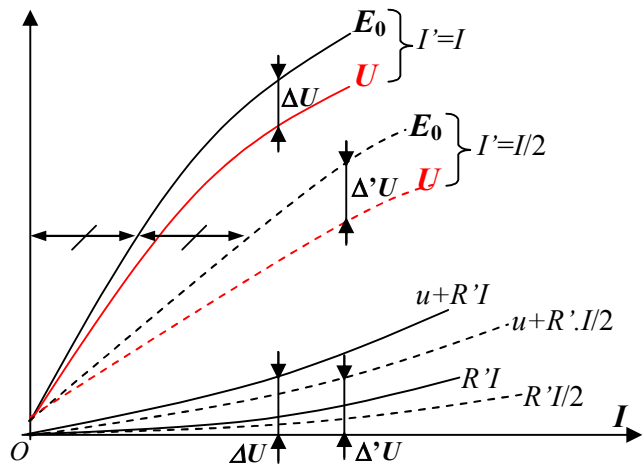
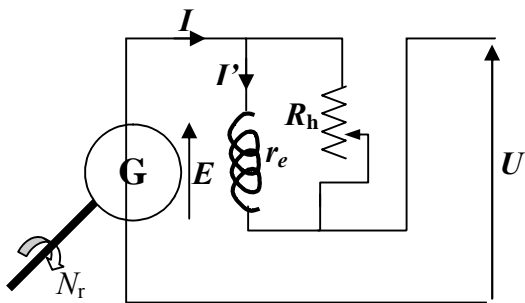
$$E = (r_e + R + R_{ch}) \times I$$



### b) Réglage de la tension

Pour modifier  $U(I)$ , on doit shunter l'inducteur. Plus le rapport du courant  $I'$  dans l'inducteur au courant  $I$  dans l'induit est faible, plus à  $I$  donné la tension  $U$  créée est faible.

La figure suivante montre la construction de  $U(I)$  pour  $I' = I$ , puis pour  $I' = I/2$ . Il faut dans le second cas une valeur double de  $I$  pour retrouver le même courant dans l'inducteur donc la même f.e.m  $E_0$ .



## 10.4 Génératrice à excitation composée

La génératrice à excitation composée ou *compound* porte sur ses pôles principaux un enroulement shunt et un enroulement série avec l'induit. On reconnaît les deux enroulements à la section du fil et au nombre de spires. Avec une grande résistance, l'enroulement shunt absorbe un faible courant ; alors que l'enroulement série qui présente une faible résistance provoque une chute de tension réduite.

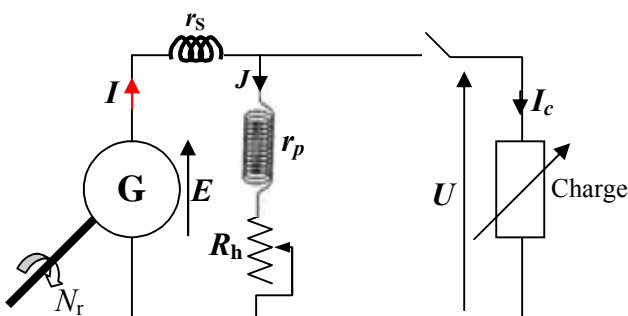


Fig. a

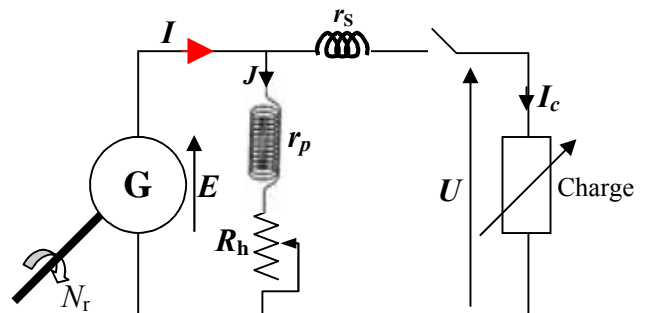


Fig. b

Selon la position de l'enroulement série, on distingue deux types de montages ; le montage courte dérivation, fig. **a**, et le montage longue dérivation, fig. **b**.

Suivant le branchement, les Ampères-Tours série peuvent s'ajouter aux A.T. shunt ou s'en soustraire. Dans le premier cas, la génératrice est dite à AT additifs ou concordants (cas du montage précédent). Dans le second cas, la génératrice est dite à AT soustractifs ou discordants.

L'amorçage s'effectue comme dans la machine à excitation shunt et la tension est réglée par  $R_h$

#### 10.4.1 Génératrice à flux concordant - Caractéristiques en charge -

##### a) Caractéristique $U=f(I)$ à $N_r$ et $R_h$ constantes

Les Ampères-Tours série proportionnels au courant débité compensent la chute de tension interne par une augmentation du flux  $\phi_0$ . Si on part de  $U_{nom}$  et si on relève  $U(I)$  à  $N_{nom}$  et  $R_h=Cste$  on obtient, suivant l'importance des AT séries, les courbes a, b et c (fig. a) :

- Courbe (a) :  $(U)_{Inom} < U_{nom}$ , la génératrice est sous (hypo) compoundée.
- Courbe (b) :  $(U)_{Inom} = U_{nom}$ , la génératrice est exactement compoundée.
- Courbe (c) :  $(U)_{Inom} > U_{nom}$ , la génératrice est sur (hyper) compoundée.

NB :  $R_e = R_h + r_p$

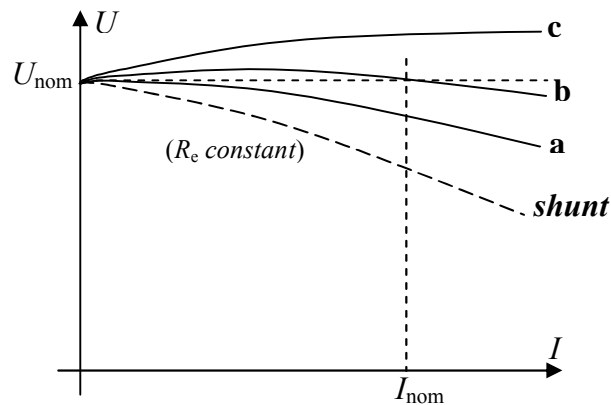


Fig. a

##### b) Caractéristique $J=f(I)$ , à $U$ et $N_r$ constantes

Pour maintenir  $U$  constante, il faut d'autant moins augmenter le courant d'excitation shunt  $J$  que la machine est compoundée.

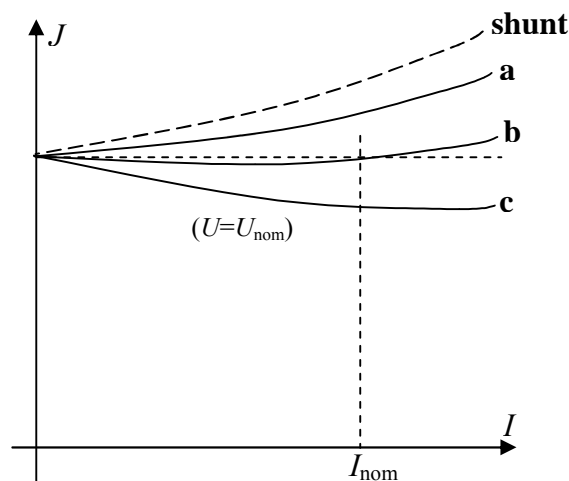


Fig. b

## 10.4.2 Prédétermination des caractéristiques en charge

Pour construire la caractéristique en charge il faut connaître :

- La caractéristique à vide  $E_0(J)$  : On la relève en utilisant l'enroulement shunt par l'essai à vide en génératrice shunt ou mieux à excitation séparée.
- Le rapport  $k$  d'équivalence : C'est le rapport du nombre de tours de l'enroulement série à celui de l'enroulement parallèle ( $k = N_s/N_p < 1$ ).  $I$  ampères dans l'inducteur série produisent les mêmes AT que  $k.I$  ampères passant dans l'inducteur shunt.
- La caractéristique de chute de tension  $u(I)$ .

### a) Caractéristique $U=f(I)$ à $N_r$ et $R_h$ constantes

Le courant d'excitation shunt équivalent dû à l'action simultanée des deux enroulements est :  $J' = J + k.I$

La f.é.m  $E_0$  et le courant  $J'$  sont liés :

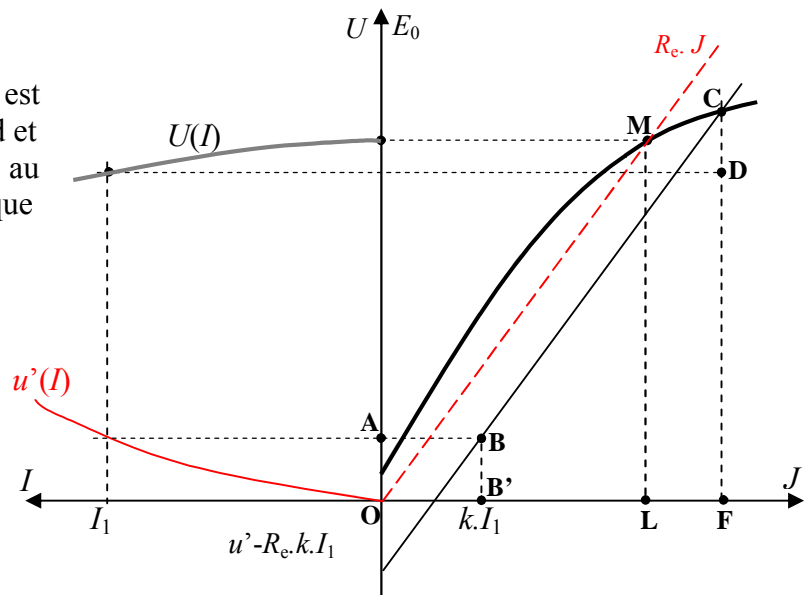
- par la caractéristique à vide  $E_0(J')$
- et par la relation  $J = \frac{U}{R_e} = \frac{E_0 - u'}{R_e} = J' - k.I$   $u' = u + r_s.I$   $E_0 = u' + R_e(J - k.I)$

On trace la droite des inducteurs  $R_e.J$ . Elle donne  $U(I=0)$ , donc  $E_0$  quand  $I$  et  $u$  sont négligeable.

Pour un courant  $I_1$ , on porte en OA la chute de tension  $u'$  lue pour  $I_1$ , en AB le courant  $k.I_1$ . Par B on mène la parallèle à la droite de l'inducteur ; en FC on lit  $E_0$ , en OF on lit  $J'$ . On en déduit :

$$U = E_0 - u' = FD \text{ qu'on reporte au droit de } I_1, \\ J = J' - k.I_1 = B'F$$

On voit que l'effet de l'enroulement série est d'autant plus fort que  $k$  est plus grand et qu'au-delà du point correspondant au fonctionnement à vide la caractéristique magnétique est moins saturée.



### b) Caractéristique $J=f(I)$ , à $U$ et $N_r$ constantes

Pour chaque valeur de  $I$ , on calcule  $E_0 = U + u$ , on lit sur  $E_0(J)$  le courant équivalent  $J'$ . On en déduit  $J$  par  $J = J' - k.I$

## 10.4.3 Génératrice à flux discordant

Au fur et à mesure que le courant débité croît la réduction de la f.m.m due aux AT série accentue la diminution de  $U$  que présentait déjà la génératrice shunt.

## 11 FONCTIONNEMENT MOTEUR

Le moteur à courant continu (MCC) est plus coûteux que le moteur à courant alternatif usuel, son entretien est plus exigeant et son usage est restreint car la distribution de l'énergie électrique se fait à courant alternatif. Son avantage réside dans le contrôle et la variation de sa vitesse de rotation ; c'est donc pour les entraînements à vitesse variable qu'on l'utilise.

### 11.1 Rappel des relations

#### - La force contre électromotrice FCEM

$$E' = \frac{p}{2\pi \cdot a} n \cdot \Omega_r \cdot \Phi = K \cdot \Omega_r \cdot \Phi$$

$n$ : Nombre de conducteurs actifs sous un pôle

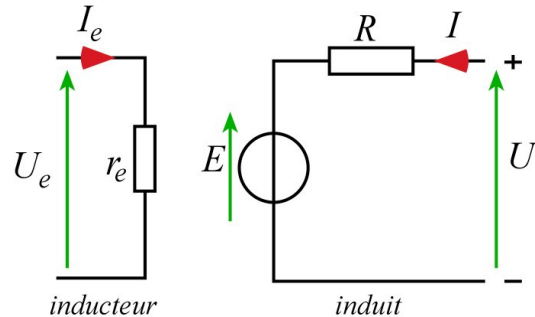
$\Omega_r$ : Vitesse de rotation en rad/s

$\Phi$ : Flux sous un pôle

$E'$ : Force contre électromotrice en V

$p$ : Nombre de paire de pôle

$a$ : Nombre de paire de voie d'enroulement



#### - Couple électromagnétique s'exerçant entre le rotor et le stator

$$C_{ém} = \frac{P_e}{\Omega_r} = \frac{E_c \cdot I}{\Omega_r}$$

$$\text{avec } E_c = K \Phi_c \Omega_r = K(\Phi_0 - \Delta\Phi) \Omega_r$$

$$\Rightarrow C_{ém} = K(\Phi_0 - \Delta\Phi) \cdot I$$

#### - Le couple utile sur l'arbre du moteur : $C_u = C_{ém} - C_p$

$$\text{- Couple dû aux pertes : } C_p = \frac{P_{fer} + P_{mec}}{\Omega_r}$$

### Bilan énergétique

$P_a$  la puissance absorbée (W) ;

$P_{em}$  la puissance électromagnétique (W) ;

$P_u$  la puissance utile (W) ;

$P_{je}$  les pertes joules à l'inducteur (W) ;

$P_j$  les pertes joules à l'induit (W) ;

$P_{fer}$  les pertes ferromagnétiques (W) ;

$P_{méca}$  les pertes mécaniques (W) ;

$U_e$  la tension de l'inducteur (V) ;

$j$  le courant d'inducteur (A) ;

$E$  la f.é.m. (V) ;

$I$  le courant d'induit (A) ;

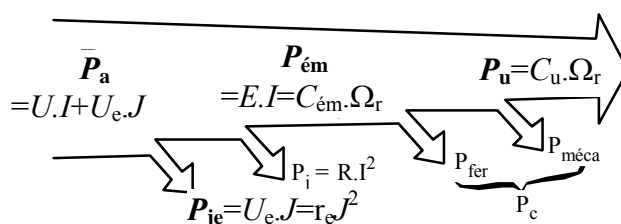
$C_{em}$  le couple électromagnétique (N.m) ;

$C_u$  le couple utile (N.m) ;

$\Omega$  la vitesse de rotation (rad.s<sup>-1</sup>) ;

$R$  la résistance d'induit ( $\Omega$ ) ;

$r_e$  la résistance d'inducteur ( $\Omega$ ).



## Remarques :

- Toute l'énergie absorbée à l'inducteur et dissipée par effet joule. On peut omettre l'inducteur dans le bilan des puissances et alors  $P_{je}$  n'apparaît pas et  $P_a = U.I$ .
- Les pertes fer et les pertes mécaniques sont rarement dissociées, la somme étant les pertes constantes  $P_c$ .
- Si le moteur est à aimants permanents,  $U_e$ ,  $J$  et  $P_{je}$  n'existent pas.

## - Couples

Soient :  $C_{em}$  le couple électromagnétique (N.m) et  $C_u$  le couple utile en sortie d'arbre (N.m).

### Pertes constantes

$$P_C = P_{em} - P_U$$

D'après le diagramme des puissances,  $P_c$  est la différence entre la puissance électromagnétique et la puissance utile.

En effet :  $P_C = P_{fer} + P_{méca} = P_{em} - P_U$

### Couple de pertes $T_P$

$$C_P = \frac{P_C}{\Omega} = C_{em} - C_U$$

$$C_P = \frac{P_C}{\Omega} = \frac{P_{em} - P_U}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_U}{\Omega} = C_{em} - C_U$$

## - Rendement

### - Mesure directe :

Cette méthode consiste à mesurer  $P_a$  et  $P_u$ .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C_u \cdot \Omega}{U.I + P_{je}}$$

### - Méthode des pertes séparées

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes.

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

## 11.2. Moteur à excitation indépendante

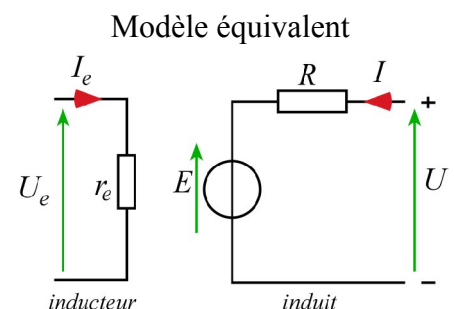
### 11.2.1 Caractéristiques générales

a) Loi d'Ohm :  $U = E + RI$

b) Vitesse de rotation :  $\Omega_r = \frac{E'}{K\Phi} = \frac{U - RI}{K\Phi}$

Le sens de rotation dépend :

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation  $J$  ;
- du sens du courant d'induit  $I$ .



### 11.2.2 Fonctionnement à vide

A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle.

$$I_0 \ll I_n \Rightarrow RI_0 \ll U \text{ et finalement } \Omega_0 = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi}.$$

La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur  $\Phi$ .

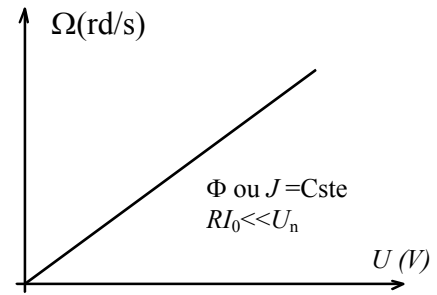
**Attention :** à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation  $I_e$  lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. En effet si  $I_e \rightarrow 0$  alors  $\Phi \rightarrow 0$  et  $\Omega_0 \rightarrow \infty$ .

Si  $\Phi$  tend vers 0, le couple électromagnétique aussi et il arrivera un moment où le couple sera inférieur au couple résistant et la machine s'arrêtera.

### 11.2.3 Fonctionnement à flux constant

$$\Omega = \frac{U - RI_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi} = K_2 U \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K\Phi}$$

La caractéristique passe approximativement par zéro.



### 11.2.4 Fonctionnement en charge

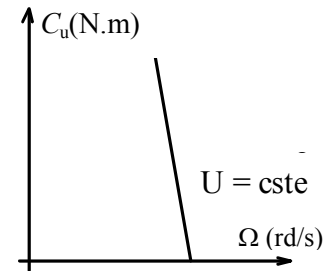
Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

$$\Omega = \frac{E}{K\Phi} \Rightarrow \Omega = \frac{U - RI}{K\Phi} = K_2 (U - RI) \quad \text{avec} \quad K_2 = \frac{1}{K\Phi} = cte$$

La vitesse dépend de :

- la tension d'alimentation  $U$  ;
- l'intensité du courant  $I$  imposée par le moment du couple résistant.

$U$  reste tout de même grand devant  $R.I$ . En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation  $U$  et varie très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.



Exprimons le courant en fonction du couple utile :

$$I = \frac{C_{em}}{K\Phi} = \frac{C_u - C_p}{K\Phi}$$

**Caractéristique mécanique du moteur :**  
la vitesse varie très peu avec la charge.

Le couple de perte  $C_p$  reste constant et faible devant le couple de charge  $C_r$ .

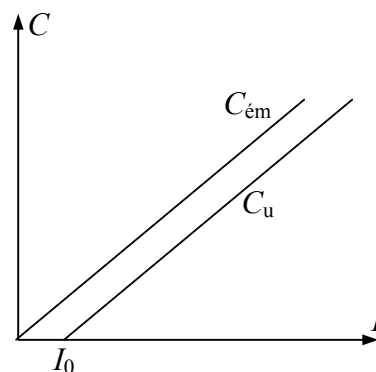
$$C_p = \frac{P_{fer} + P_{mec}}{\Omega_r}$$

Si on admet que les pertes mécaniques et les pertes fer sont proportionnelles à la vitesse de rotation alors le couple des pertes est constant.

$$P_{mec} = K_1 \cdot \Omega \quad P_{fer} = K_2 \cdot \Omega$$

$$\Rightarrow (P_{mec} + P_{fer}) / \Omega = K_1 + K_2 = K_3 = Cste$$

$$\Rightarrow \boxed{C_u = C_{em} - K_3}$$



## Mode de fonctionnement usuel

L'alimentation de l'induit sous tension réglable présente deux avantages :

- mise en vitesse progressive avec suppression de la surintensité ;
- vitesse largement variable.

C'est le mode de fonctionnement utilisé lorsque la vitesse doit varier.

### Conclusion :

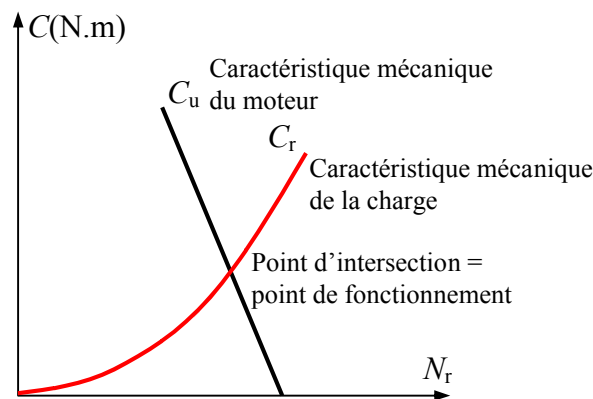
- La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation  $\Omega \approx \frac{U}{K\Phi}$  .
- La charge impose la valeur du courant  $I \approx \frac{C_r}{K\Phi}$  .

#### 11.2.5 Point de fonctionnement

Une charge oppose au moteur un couple résistant  $C_r$ . Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile  $C_u$  de telle sorte que :

$$C_u = C_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.

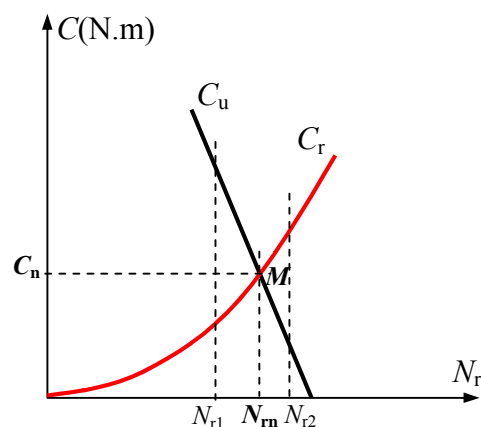


Le fonctionnement est stable si tout écart accidentel de vitesse crée une différence de couple qui l'annule.

### Exemple :

- Si  $N_r$  diminue (à  $N_{r1}$ ), la différence  $C_u - C_r$  est positive  
⇒ le groupe accélère.
- Si  $N_r$  augmente (à  $N_{r2}$ ), la différence  $C_u < C_r$   
⇒ le groupe ralentit.

Donc le point M est stable.

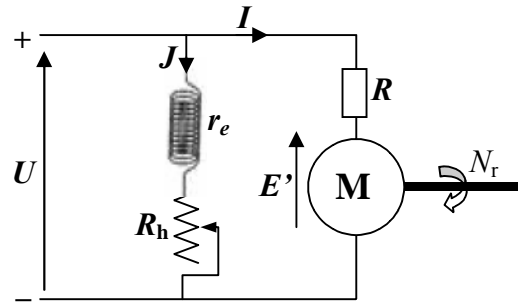


Les caractéristiques du MCC dépendent de son mode d'excitation et de la nature constante ou variable de la tension continue qui l'alimente. Il en résulte quatre cas principaux qu'il faut traiter séparément.

### 11.3. Moteur à excitation shunt sous tension constante

$$U = E + RI = R_e J$$

$$\Omega_r = \frac{E'}{K\Phi} = \frac{U - RI}{K\Phi}$$



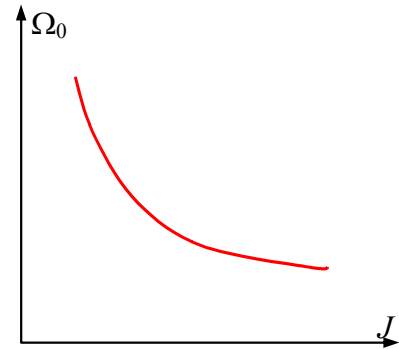
#### 11.3.1 Caractéristiques de vitesse

##### a) Caractéristique de vitesse à vide $\Omega_0 = f(J)$ à $C_u$ nul et $U$ constante

A vide  $I$  est faible, les effets de la réaction magnétique de l'induit sont alors négligeables.

$$\Rightarrow \Omega_0 = \frac{E_0}{K\Phi} \approx \frac{U}{K\Phi_0}$$

La vitesse à vide est inversement proportionnelle au flux utile Produit par l'inducteur.



##### b) Caractéristique de vitesse en charge $\Omega_r = f(I)$ à $U$ et $J$ constante

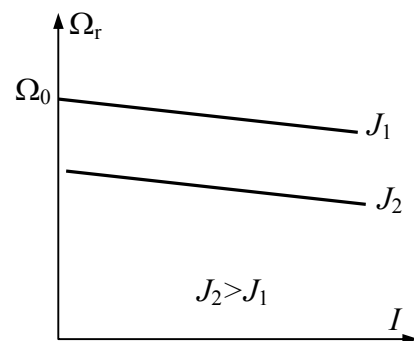
Quand le couple demandé au moteur augmente le courant d'induit  $I$  augmente et les effets de la RMI aussi.

$$\begin{aligned} U &= E_c + RI = K\Omega_r \Phi_c + RI \\ &= K\Omega_r (\Phi_0 - \Delta\Phi) + RI \end{aligned}$$

$$U - RI = K\Omega_r \Phi_0 \left(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}\right) \Rightarrow U \left(1 - \frac{RI}{U}\right) = K\Omega_r \Phi_0 \left(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}\right)$$

$$\frac{U}{K\Phi_0} \left(1 - \frac{RI}{U}\right) = \Omega_r \left(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}\right) = \Omega_0 \left(1 - \frac{RI}{U}\right)$$

$$\Rightarrow \Omega_r = \Omega_0 \frac{\left(1 - \frac{RI}{U}\right)}{\left(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0}\right)}$$



Quand  $I$  augmente, le numérateur de cette équation diminue plus que le dénominateur.  
A courant inducteur donné, la vitesse diminue un peu à partir de  $\Omega_0$  quand  $I$  croît.

### 11.3.2 Caractéristiques de couple

On a le couple électromagnétique égale à :  $C_{ém} = K(\Phi_0 - \Delta\Phi).I$

$C_{ém}$  est à peu près proportionnel au courant d'induit  $I$  (pour un  $J$  donné).

Pour un  $I$  donné,  $C_{ém}$  diminue avec  $\Phi_0$ .

Le couple utile  $C_u$  est inférieur à  $C_{ém}$  à cause des pertes dans le fer et des pertes mécaniques. A  $J$  donné, ces pertes dépendant de la vitesse et du flux sont à peu près constantes.

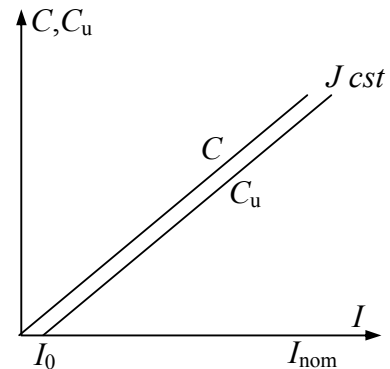
A vide, l'induit absorbe :

$$P_0 = U.I_0 = P_{méc} + P_{fer} + RI^2 \\ \approx P_{méc} + P_{fer}$$

En charge :

$$C_u = C_{ém} - \frac{P_{méc} + P_{fer}}{\Omega} \\ \approx \frac{EI - UI_0}{\Omega} \approx \frac{E(I - I_0)}{\Omega}$$

$$C_u = K(\Phi_0 - \Delta\Phi).(I - I_0)$$



Les courbes  $C_u(I)$  se déduisent donc des courbes  $C_{ém}(I)$  par des translations égales à  $I_0$ .

### 11.3.3 Etude du démarrage

On ne peut appliquer directement la tension  $U$  à l'induit du moteur à l'arrêt, le courant serait beaucoup trop fort.

$$\text{Au démarrage : } \Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \text{ et donc } I_d = \frac{U_n - E}{R} = \frac{U_n}{R} \gg I_n$$

#### Conséquences

La pointe de courant va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet joule.

#### Solutions pour limiter le courant

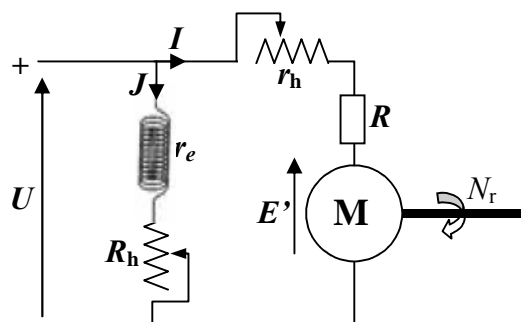
**Solution 1 :** On utilise des rhéostats de démarrage. Cette solution est peu économique.

Pour limiter le courant de démarrage  $I_d$ , on met en série avec l'induit un rhéostat de démarrage ( $r_h$ ) :

$$\Rightarrow I_d = \frac{U_n}{R + r_h}$$

Le couple de démarrage :  $C_{dém} = K.\Phi.I_d$

Lors du démarrage (en charge), il va falloir avoir un couple de démarrage plus important que le couple utile nominal et cela pour vaincre l'inertie de la charge.



- On admet  $I_d > I_n$  (1,5 à 2,5  $I_n$ )
- On donne à  $\Phi$  sa valeur maximum en donnant à la résistance du rhéostat d'excitation ( $R_h$ ) une valeur nulle.

Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse, la *f.é.m* apparaît et le courant diminue.

$$U = E + (R + r_h)I \Rightarrow I = \frac{U - E}{R + r_h}$$

Si  $I$  diminue le couple décroît aussi. Il faut diminuer progressivement le rhéostat de démarrage au fur et à mesure que la vitesse augmente

**Solution 2 :** On démarre sous une tension d'alimentation réduite.

$$\Rightarrow U_d = RI_d = R.1,5.I_n$$

## 11.4 Moteur à excitation série

### Principe

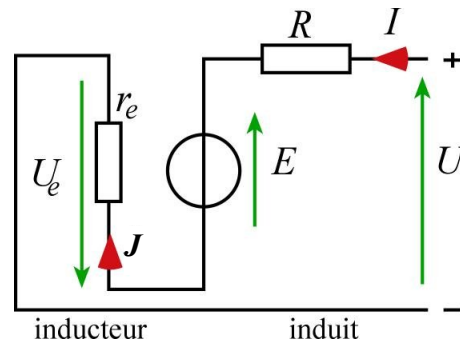
L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

Conséquence :  $I = J$

et comme  $\Phi = Cste.J$  (hors saturation)

$$E = K\Phi\Omega = k\Omega I$$

$$\text{et } C_{em} = K\Phi I = kI^2$$



### Modèle équivalent et caractéristiques

Caractéristiques :

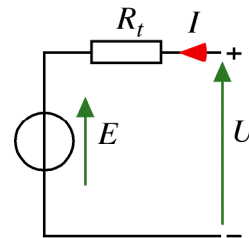
$$U = E + R_t I$$

$$E = k\Omega I$$

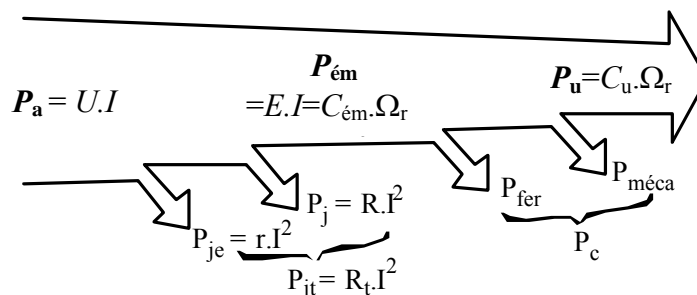
$$C_{em} = kI^2$$

$$\Omega = \frac{U - R_t I}{kI}$$

Schéma équivalent :  $R_t = r_e + R$



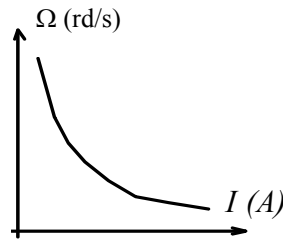
### Bilan énergétique



## Fonctionnement

### Fonctionnement à vide

La charge impose le courant :  $I = \sqrt{\frac{C_{em}}{k}}$



Si  $C_{em}$  tend vers 0,  $I$  tend aussi vers 0 et  $\Omega$  tend vers l'infini (si l'on ne tient pas compte des frottements).

*Alimenté sous tension nominale, le moteur série ne doit jamais fonctionner à vide au risque de s'emballer.*

## Démarrage

### Tension de démarrage :

Comme pour le moteur à excitation indépendante, il est préférable de démarrer sous tension d'induit réduite.

En effet au démarrage :  $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \Rightarrow I = \frac{U}{R_l}$

### Couple de démarrage :

Le moteur série peut démarrer en charge.

Supposons que l'on limite le courant de démarrage  $I_d$  à 1,5 fois le courant nominal  $I_n$ .

Excitation indépendante :  $C_d = K\Phi I_d = 1,5K\Phi I_n = 1,5C_n$

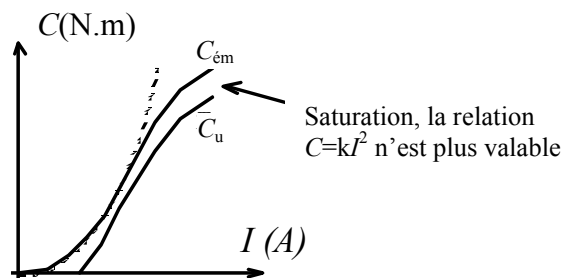
Excitation série :  $C_d = kI_d^2 = k(1,5I_n)^2 = 2,25kI_n^2 = 2,25C_n$

Pour les mêmes conditions, le moteur série possède un meilleur couple de démarrage que le moteur à excitation indépendante.

## Caractéristique $C=f(I)$

$$C_{em} = kI^2$$

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



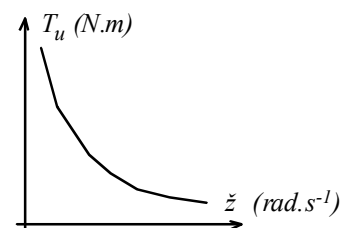
## Caractéristique mécanique $C=f(\Omega)$

### Fonctionnement sous tension nominale

Si nous négligeons les différentes pertes :

$$E = U \quad ; \quad I = \frac{U}{k\Omega} \quad \text{et} \quad C_u = kI^2 = \frac{U^2}{k\Omega^2}$$

Finalement :  $C_u \Omega^2 = C^{te}$



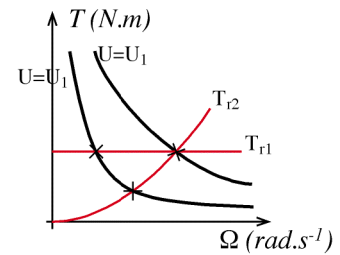
*Sous tension nominale, le moteur à excitation en série ne peut pas fonctionner à faible charge car la vitesse dépasserait largement la limite admise.*

### Fonctionnement sous tension variable

La diminution de la tension d'alimentation permet d'obtenir un déplacement de la caractéristique mécanique.

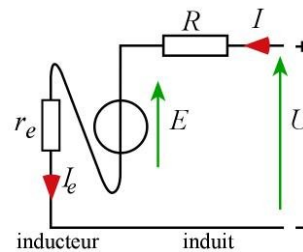
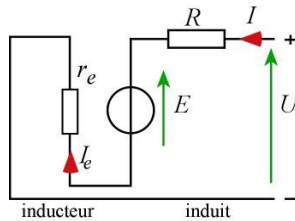
$T_3$  et  $T_{r2}$  sont les caractéristiques de deux charges différentes.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des deux caractéristiques  $T_u$  et  $T_r$ .



### Sens de rotation

**Rappel :** pour changer le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il faut inverser soit  $I$ , soit  $I_e$ . Comme pour le moteur à excitation série  $I=I_e$ , pour changer son sens de rotation il faut inverser la connexion entre l'inducteur et l'induit.



## 11.5 Moteur universel

On constate donc que le courant dans un moteur à excitation série peut-être inversé sans que le sens de rotation le soit.

Le moteur peut donc fonctionner en courant alternatif.

Pour optimiser son fonctionnement en courant alternatif il subit quelques modifications.

On l'appelle le **moteur universel**.