

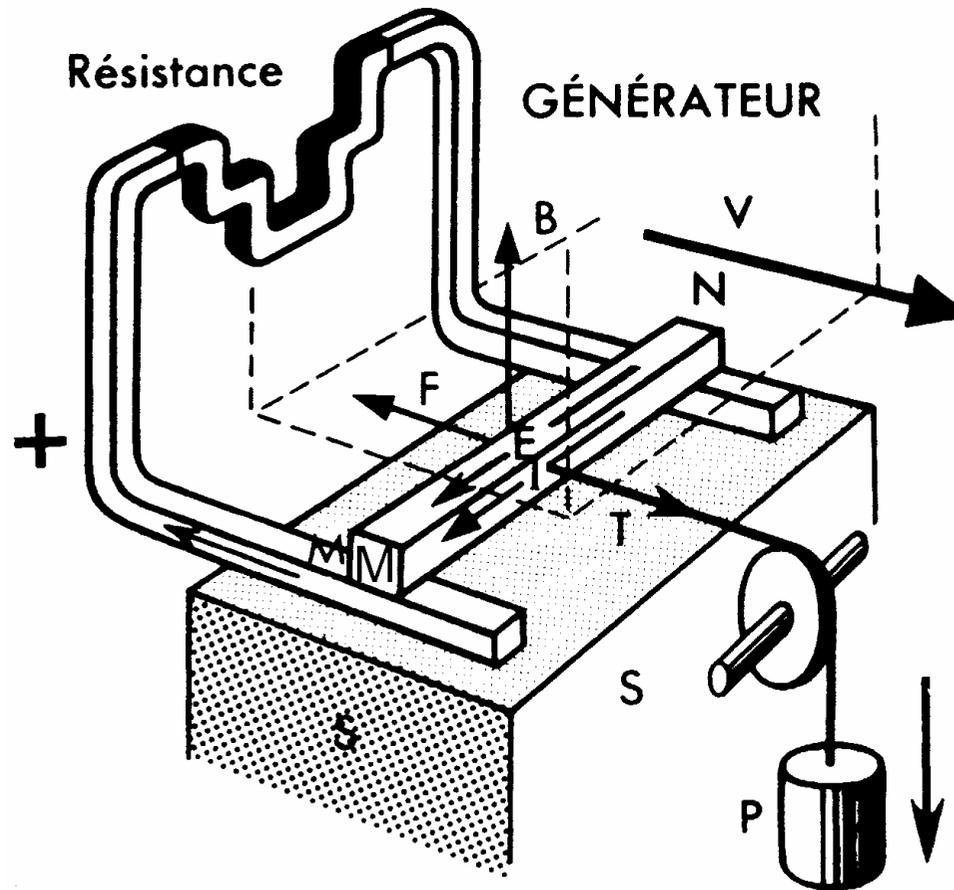
# **Le Moteur à courant continu**

---

# Principe du générateur continu

$$E = B.L.V$$

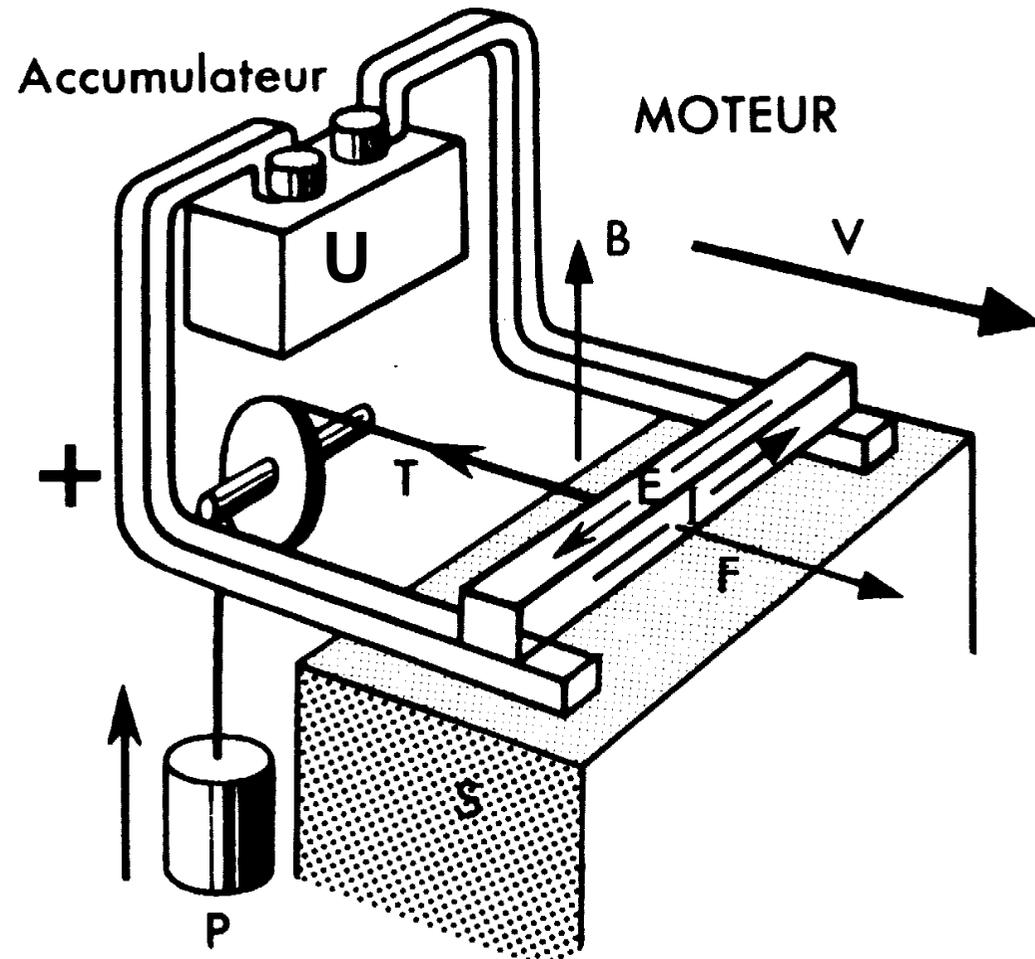
$$I = \frac{E}{R}$$



# Principe du moteur continu

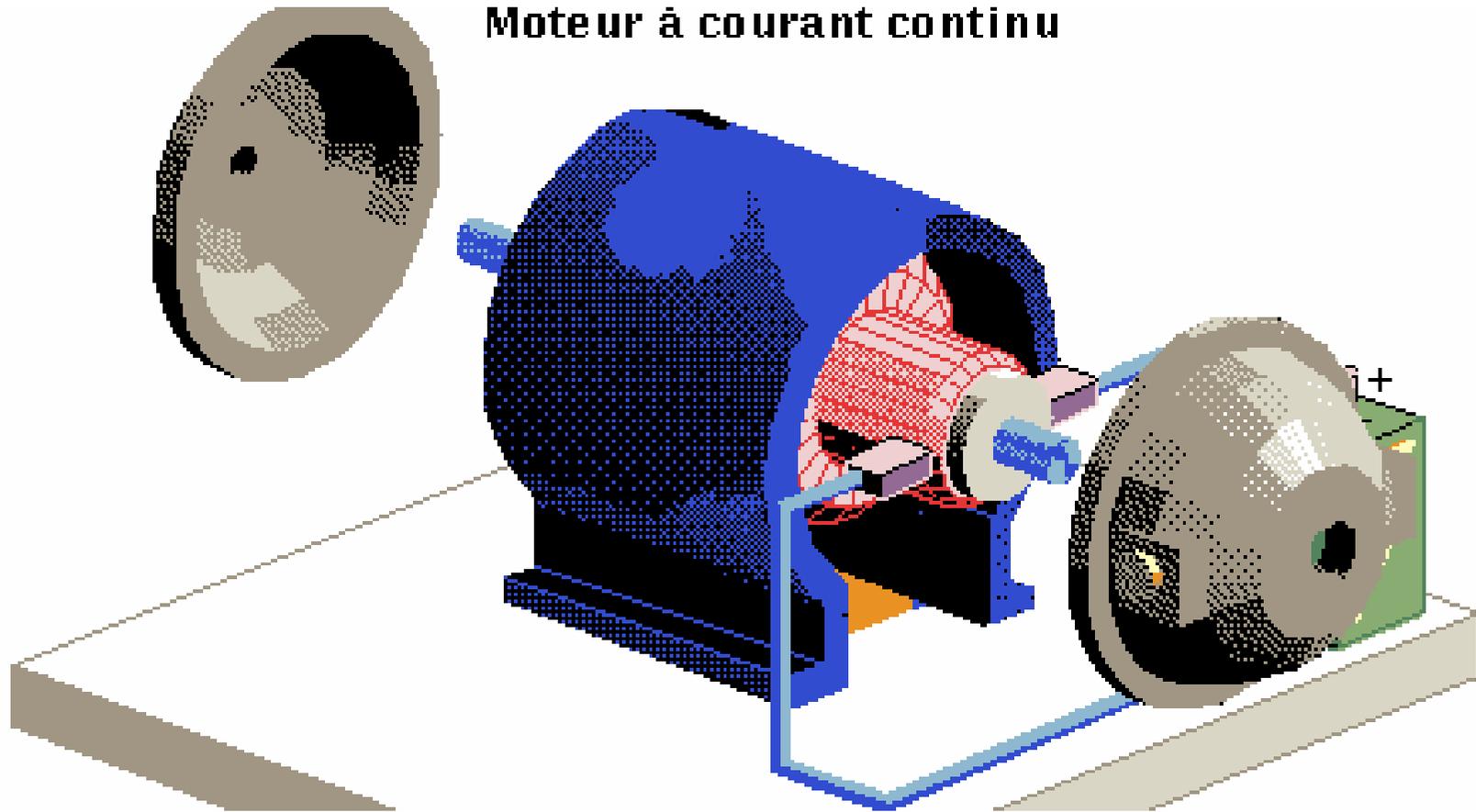
$$F = B.I.L$$

$$I = \frac{U - E}{R}$$



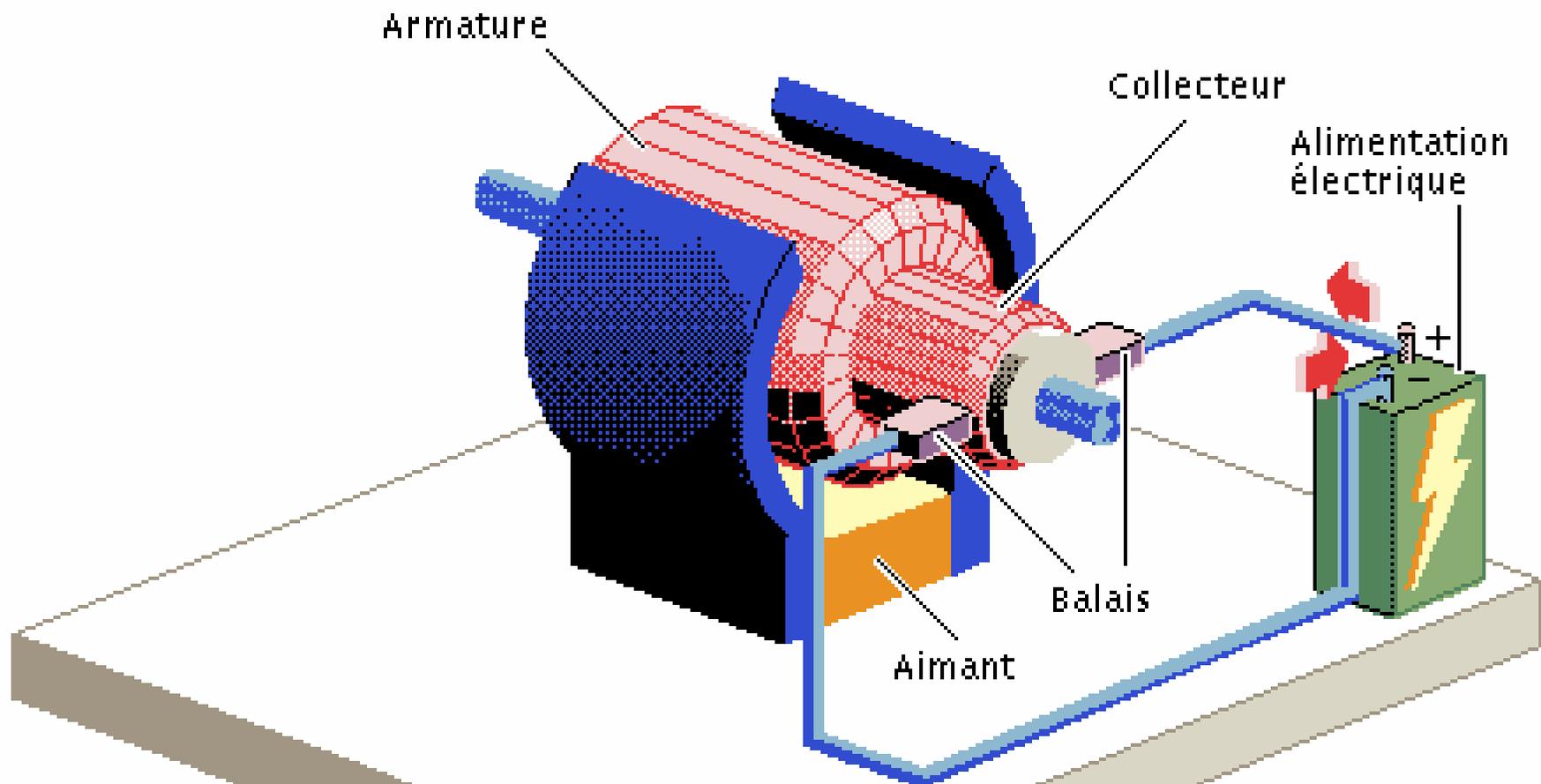
# Machine à courant continu

Moteur à courant continu



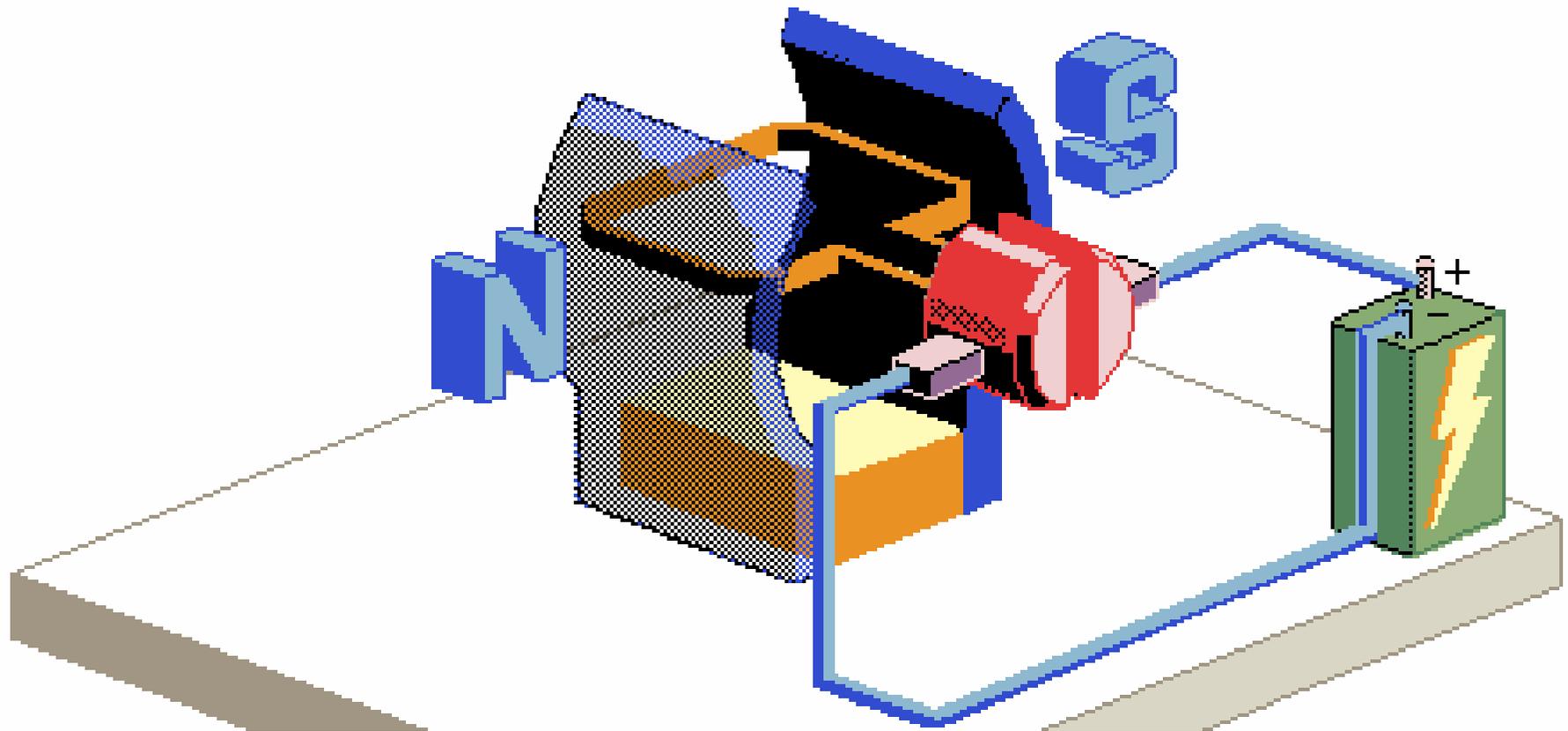
# Constitution

## Moteur à courant continu



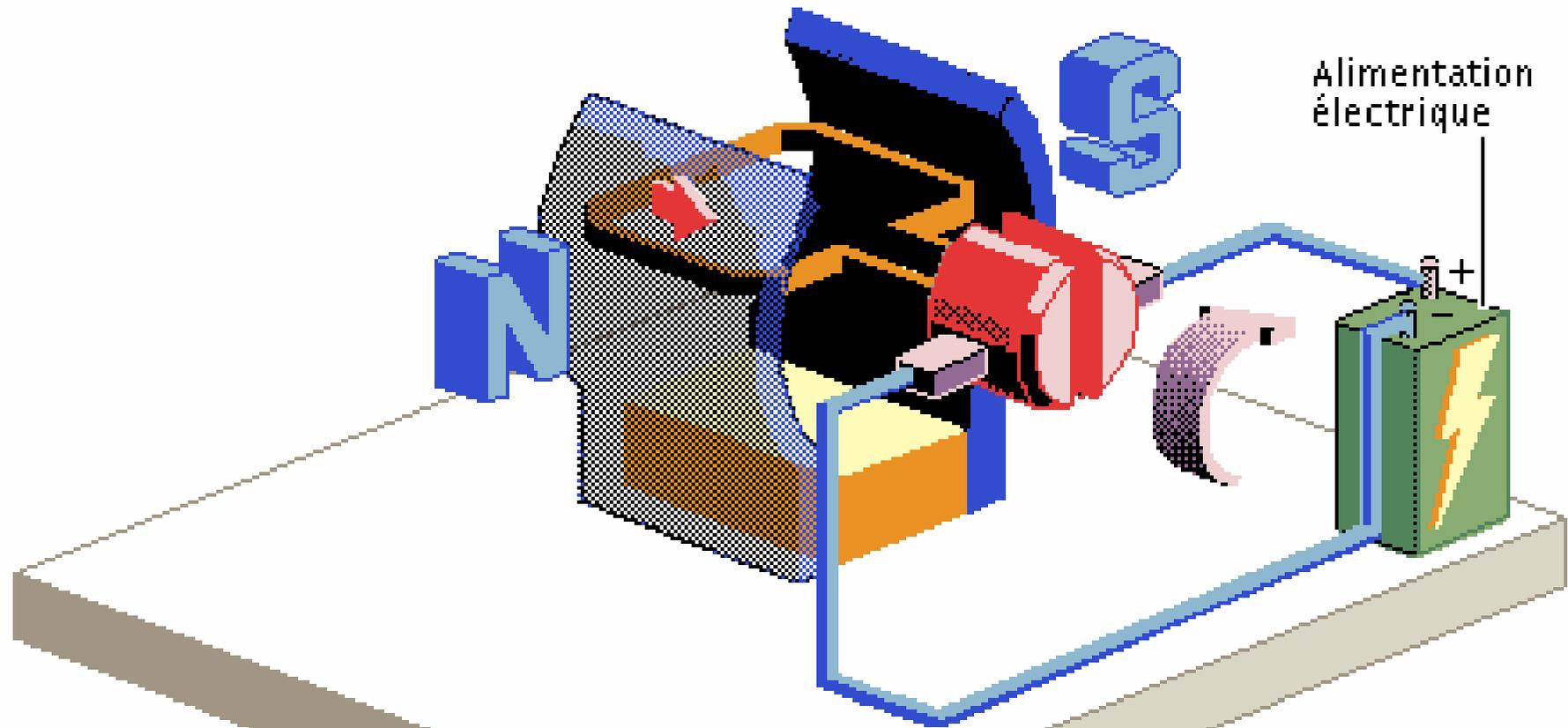
# Enroulements

Moteur à courant continu



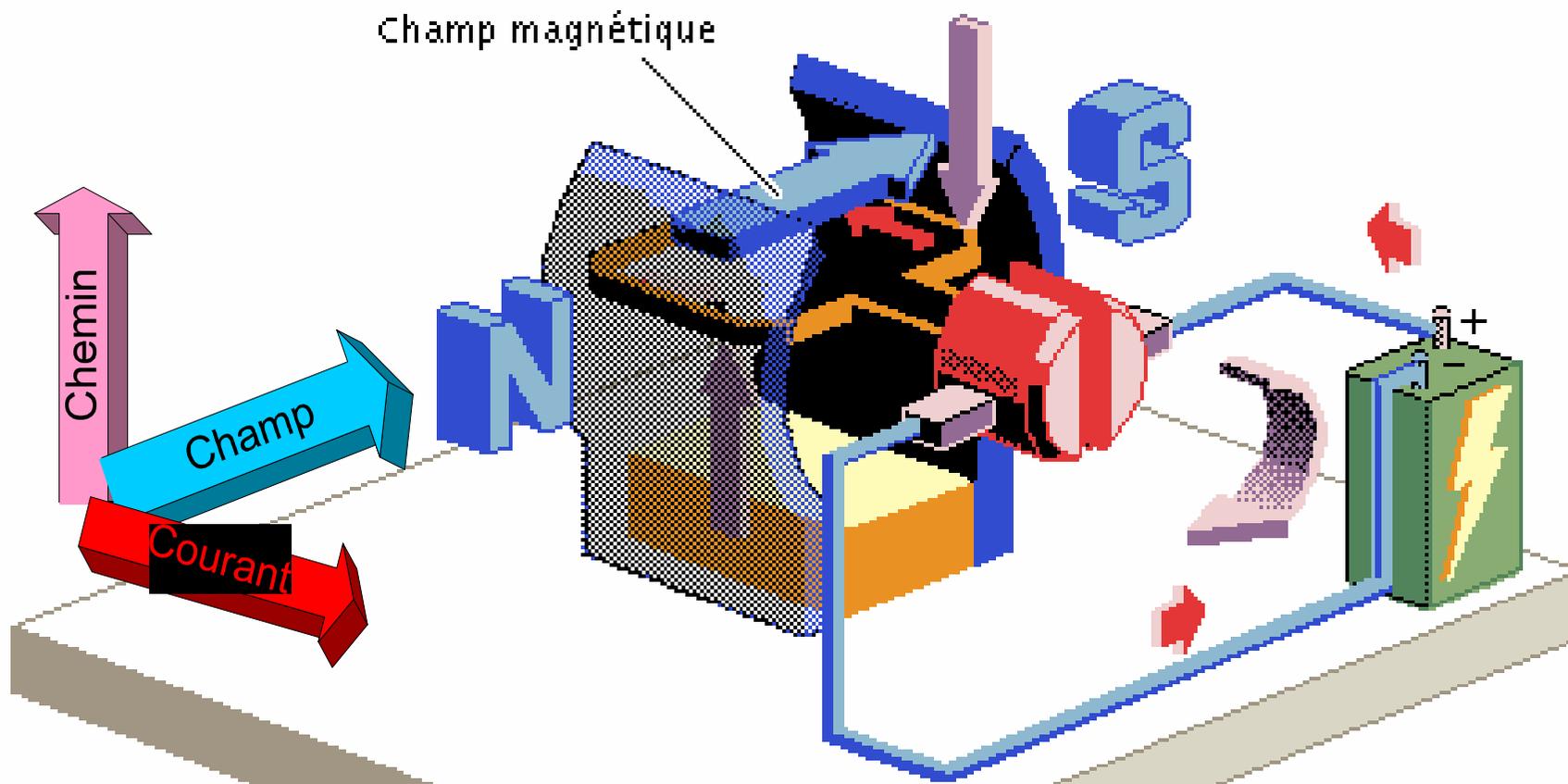
# Circulation du courant

## Moteur à courant continu



# Création du couple

## Moteur à courant continu



# Structure générale

Moteur élémentaire

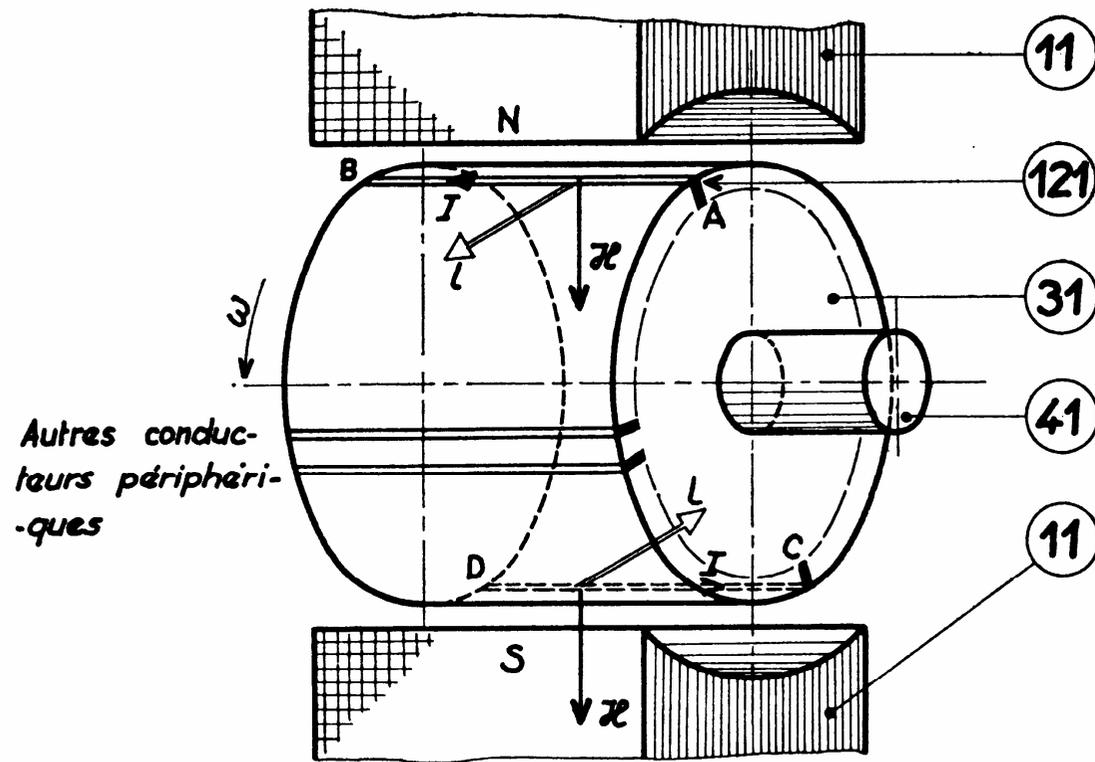


Fig. 1

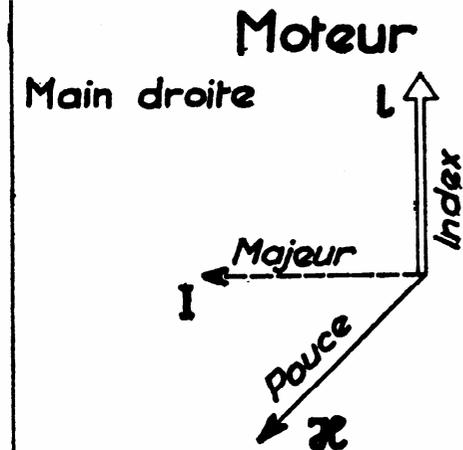


Fig. 2

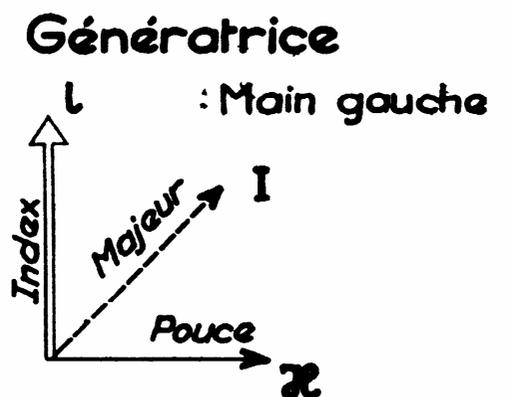


Fig. 3

# Constituants principaux

Machine à courant continu  
Disposition générale

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

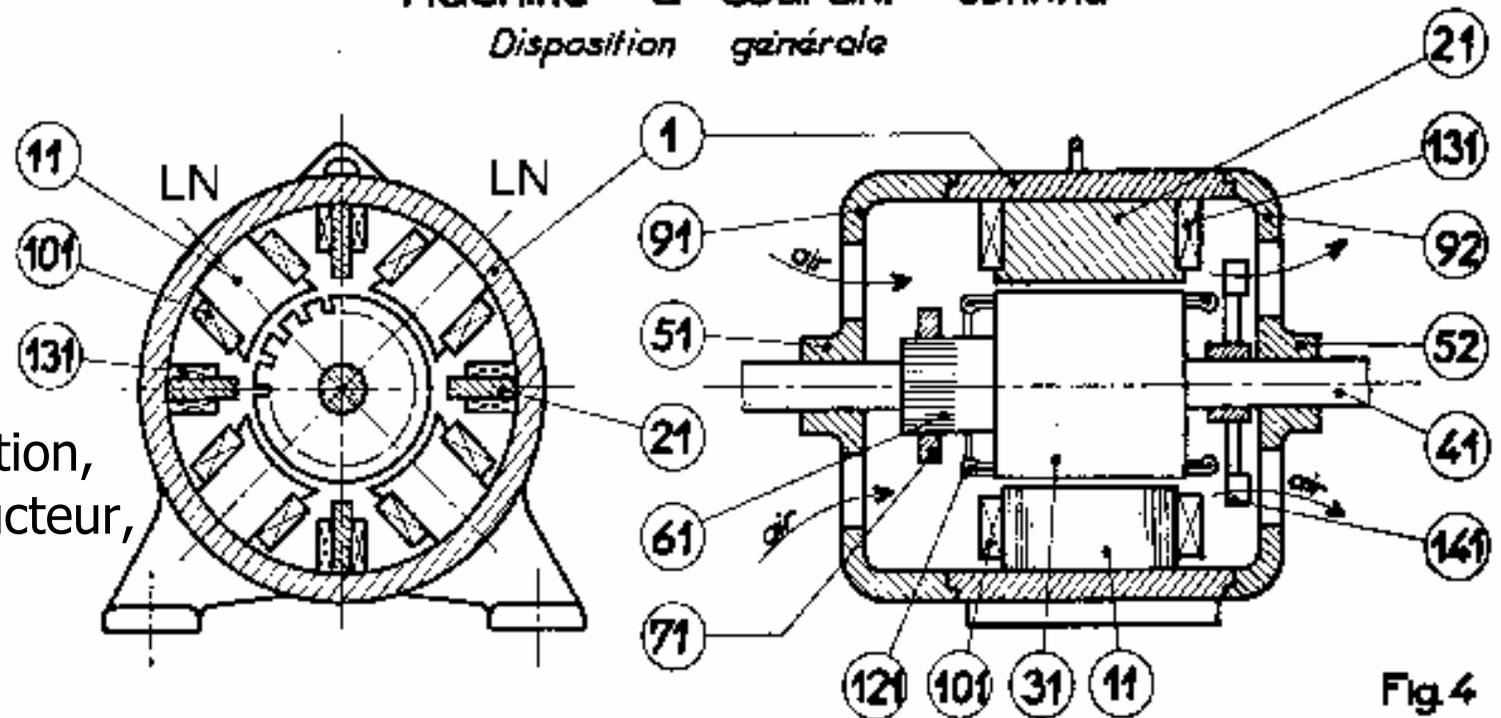
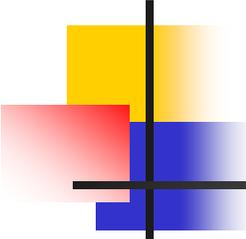


Fig. 4



# Enroulement

---

- n L'enroulement de l'induit est fermé sur lui-même.
- n Les conducteurs sont logés dans des encoches, chaque conducteur est le siège d'une FEM qu'on recueille à l'aide du collecteur (1encoche = une lame de collecteur) (figure 27, 28).
- n Les FEM sous un pôle ont toutes le même sens (figure 31, 33).
- n L'enroulement de la machine peut être de type imbriqué (figure 31, 32) ou ondulé (figure (33, 34).
- n Voie d'enroulement : zone dans la quelle les FEM ont le même sens.

# Enroulement de l'induit

## BOBINAGE D'INDUIT

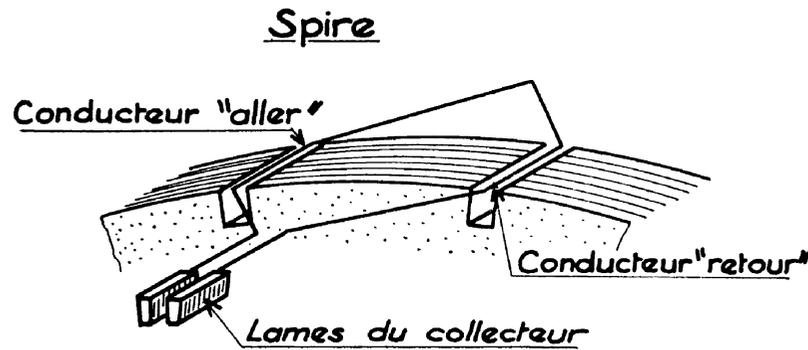


Fig. 27

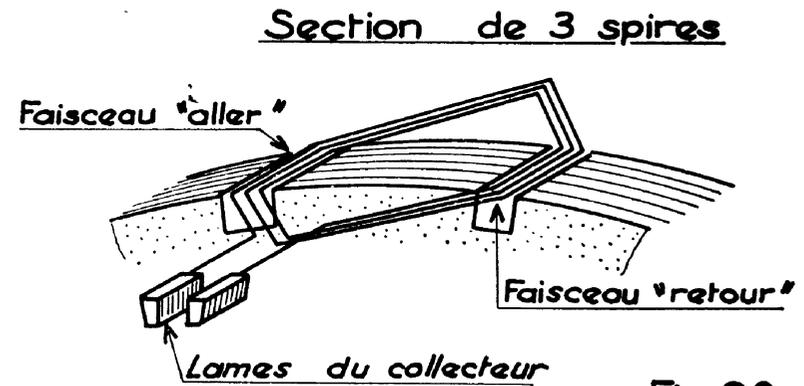


Fig. 28

## Bobine à deux sections

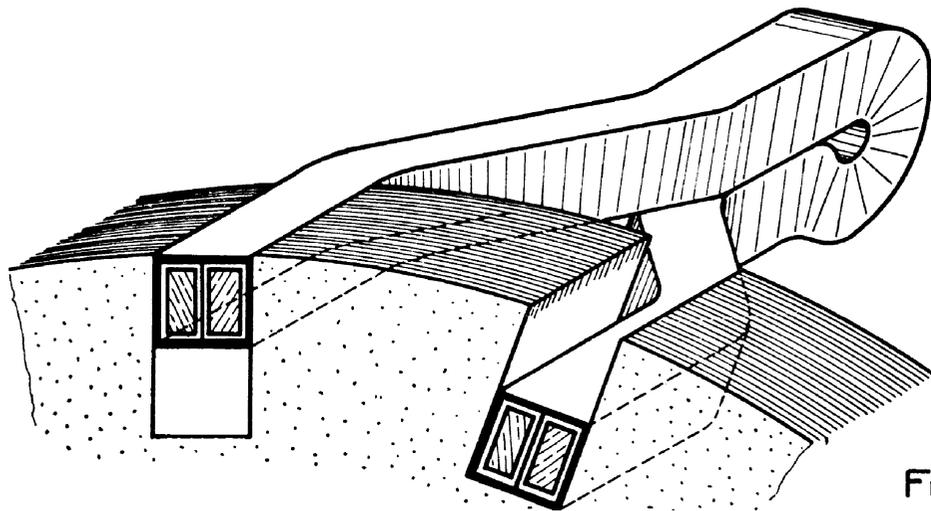


Fig. 29

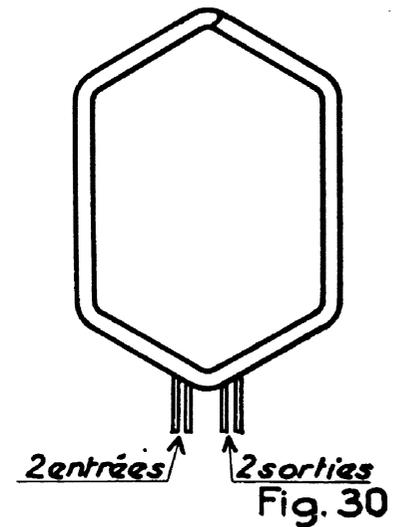
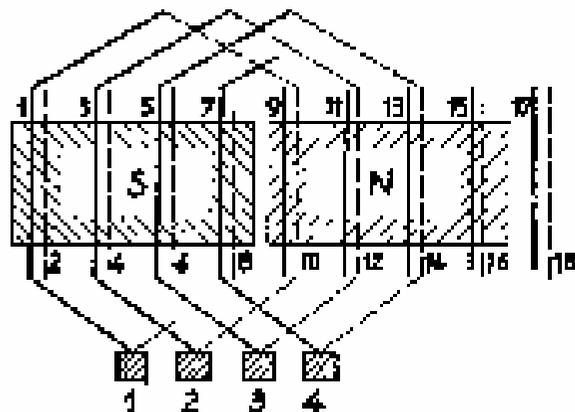


Fig. 30

# Enroulement imbriqué

Développement



Induit

Pas arrière

$$Y_1 = 18 - 1 = 17$$

Pas avant

$$Y_2 = 3 - 18 = -15$$

Collecteur

Pas résultant

$$Y = Y_1 + Y_2 = 17 - 15 = 2$$

Pas ou collecteur: 1

Enroulement imbriqué

Induit en barre

Lapins par section

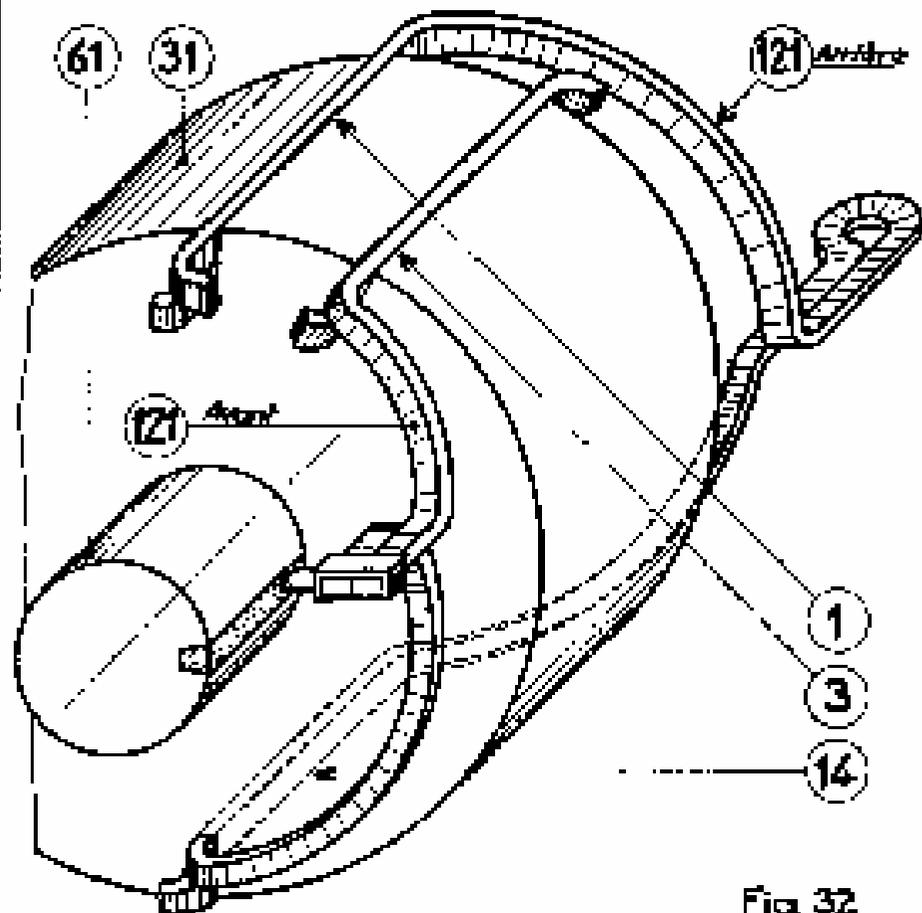
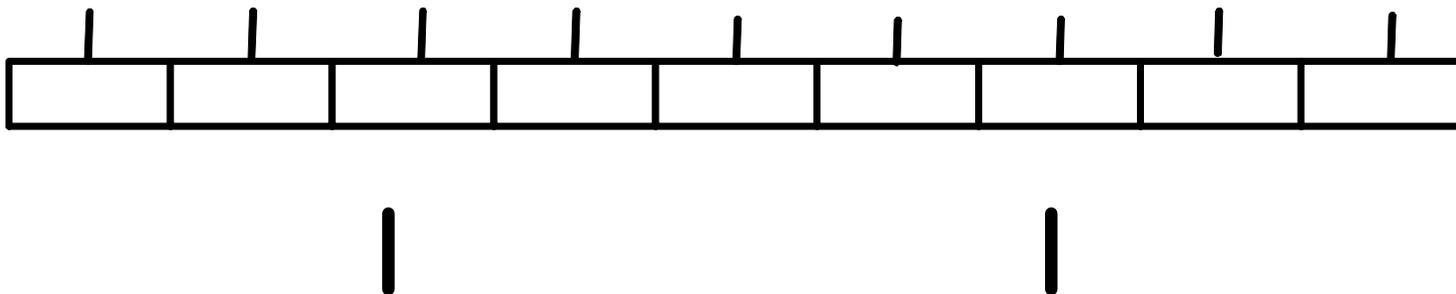
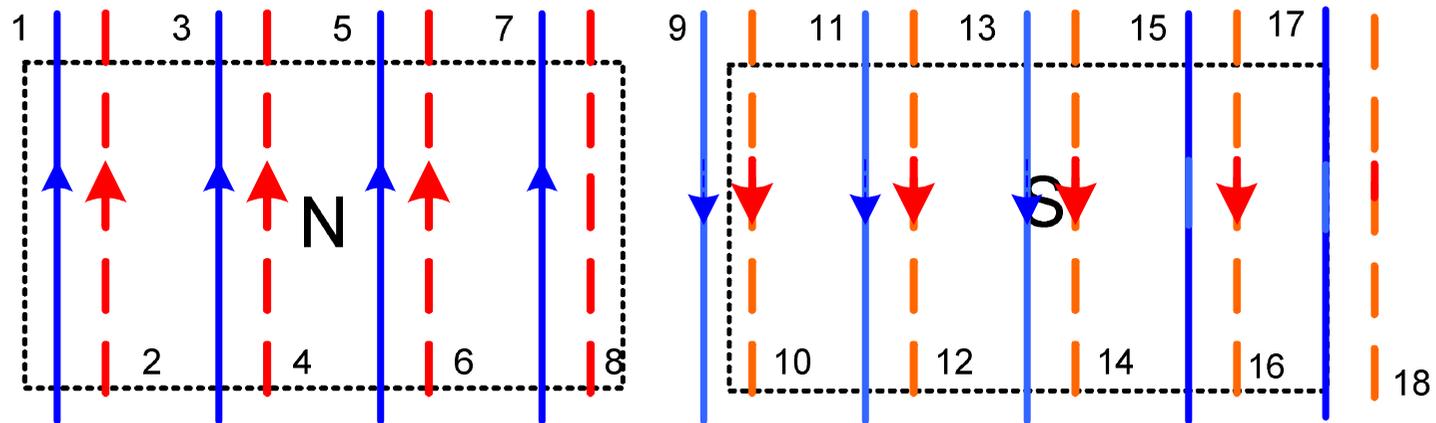


Fig. 31

Fig. 32

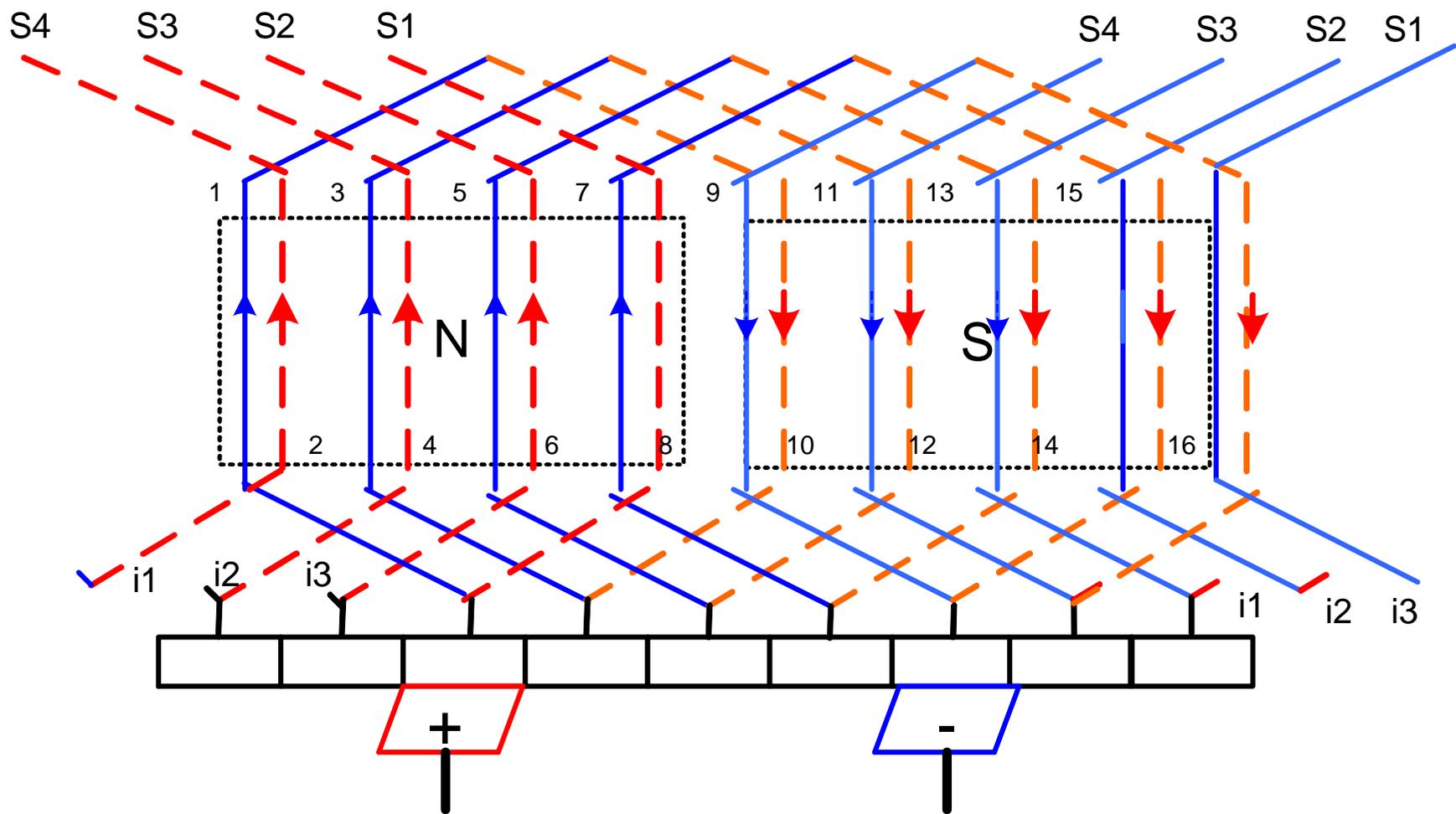
# Exemple

n Machine bipolaire, 9 encoches, 2 conducteurs/encoche

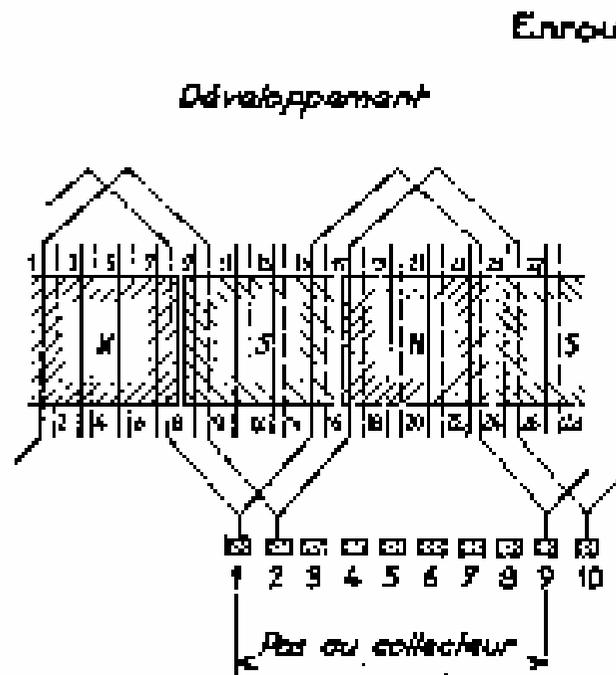


# Exemple

n Machine bipolaire, 9 encoches, 2 conducteurs/encoche



# Enroulement ondulé



4 pôles 17 ancoches - 17 lames

Induit

Pas arrière

$$Y_1 = 24 - 15 = 9$$

Pas avant

$$Y_2 = 31 - 24 = 7$$

Collecteur

Pas: 8

Fig. 33

Enroulement ondulé

Induit en barre  
1 spine par section

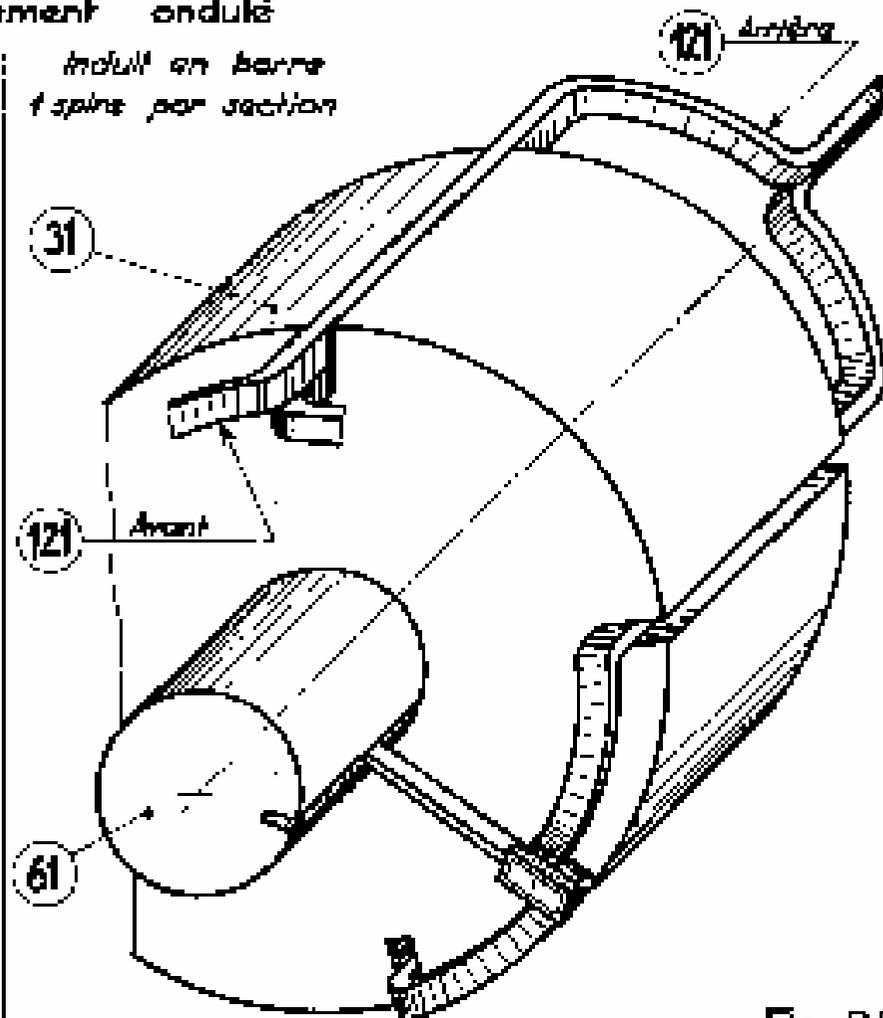
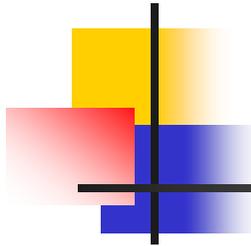
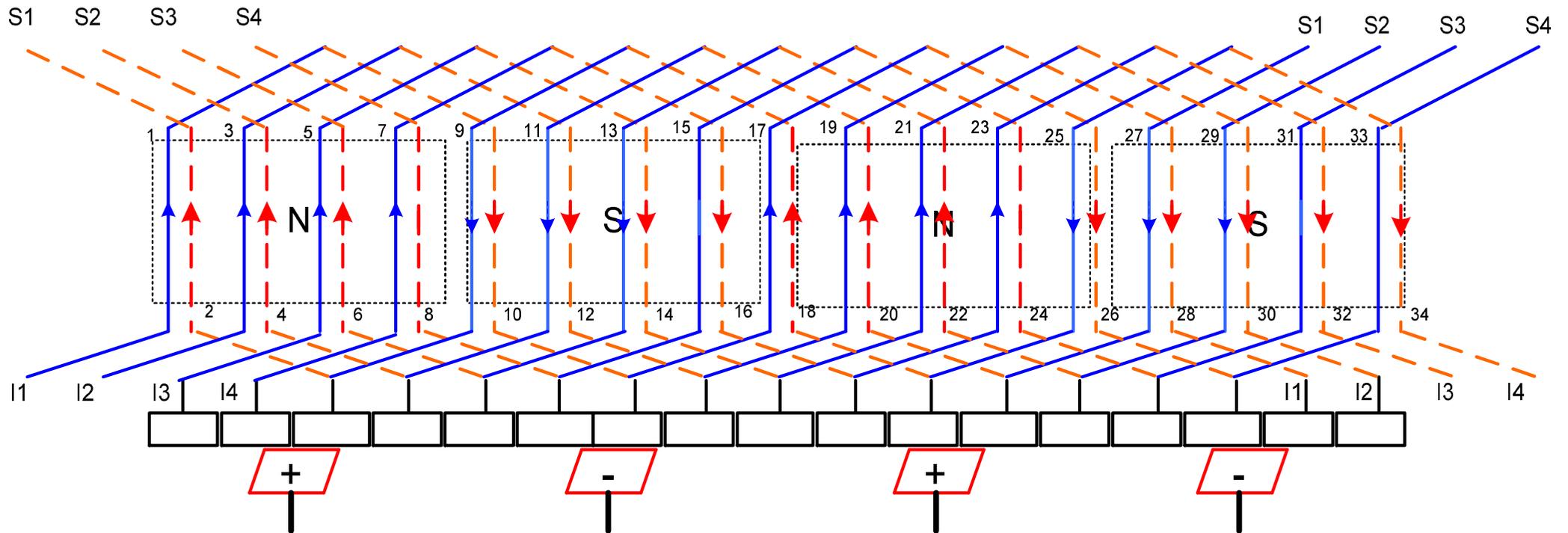


Fig. 34

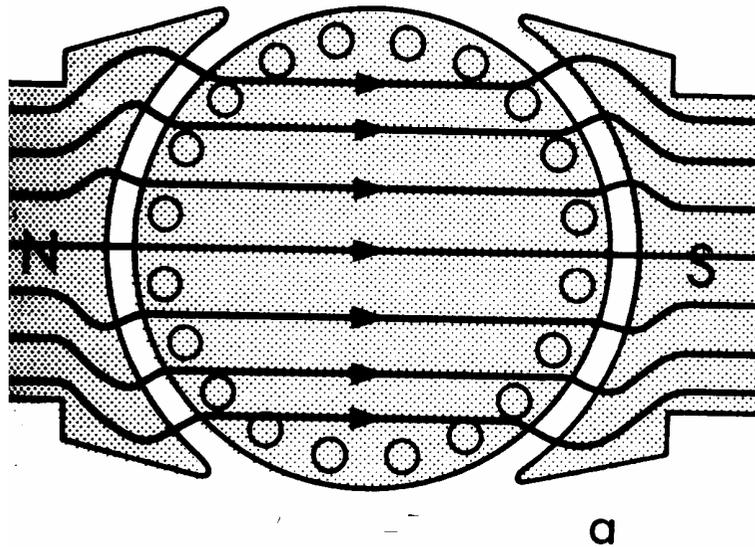


# Exemple

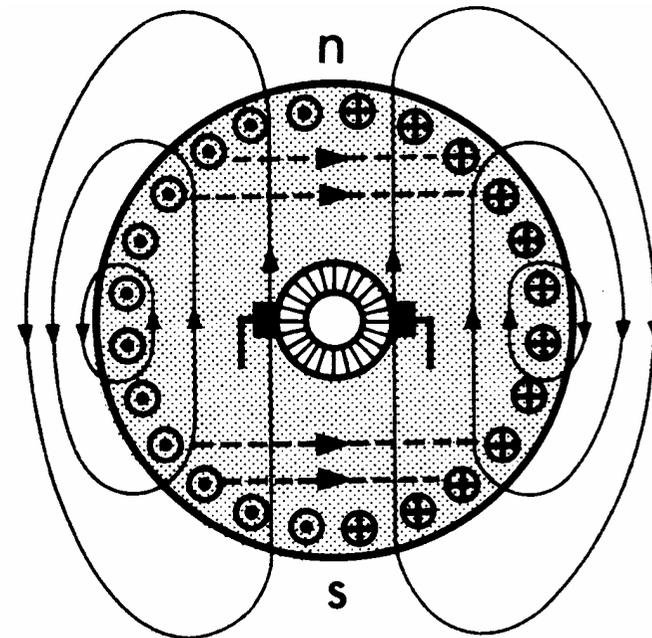
n Machine quadripolaire, 17 encoches, 2 conducteurs/encoche



# Répartition du flux

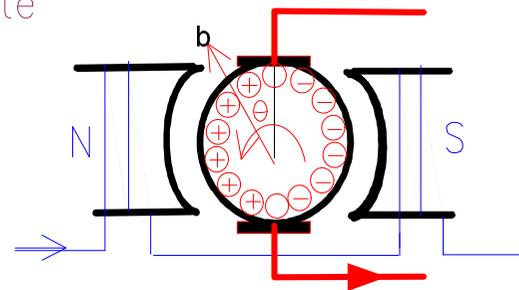
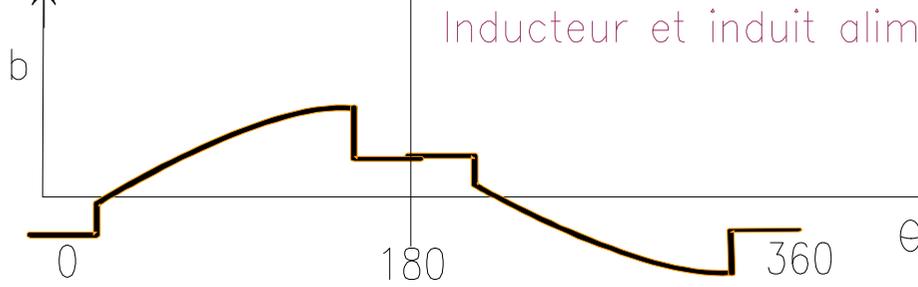
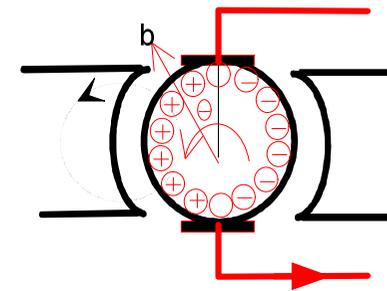
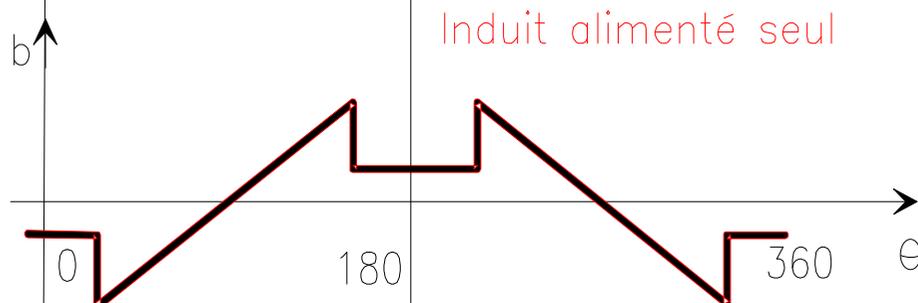
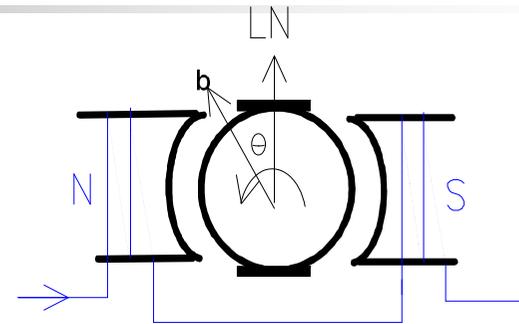
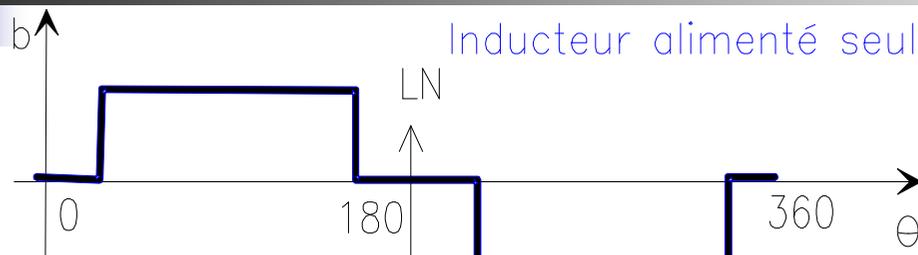


Inducteur seul alimenté

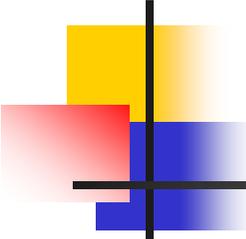


Induit seul alimenté

# Réaction d'induit



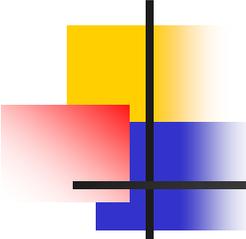
Réaction d'induit dans une machine à courant continu



# Conséquences de la réaction d'induit

---

- n La réaction d'induit :
  - n crée du flux sur la ligne neutre, donc une mauvaise commutation,
  - n diminue le flux utile par pôles, donc produit une instabilité.



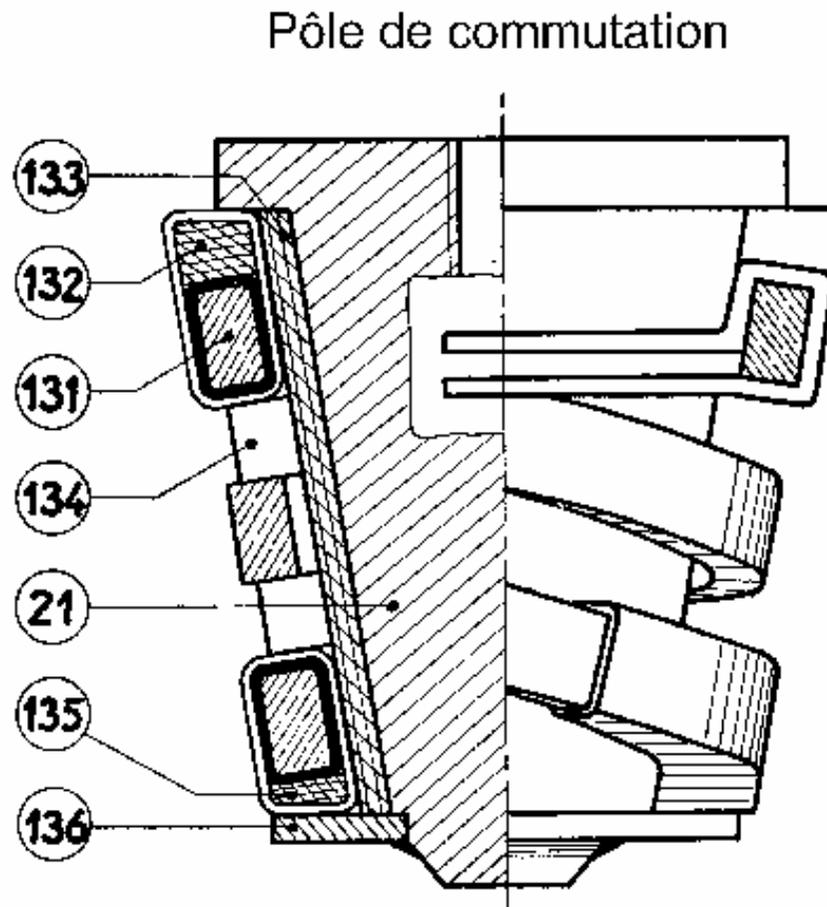
# Compensation de la réaction d'induit

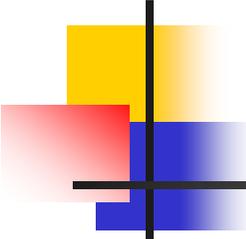
---

- n Placer sur la ligne neutre, des pôles dit de commutation produisant un flux opposé et proportionnel au courant d'induit.
- n Augmenter l'entrefer (pis aller).
- n Utiliser des pôles avec encoches augmentant le trajet du flux transversal.
- n Utiliser des pôles avec un enroulement de compensation.

# Compensation de la réaction d'induit

- n Placer sur la ligne neutre des pôles dit de commutation produisant un flux opposé et proportionnel au courant d'induit.





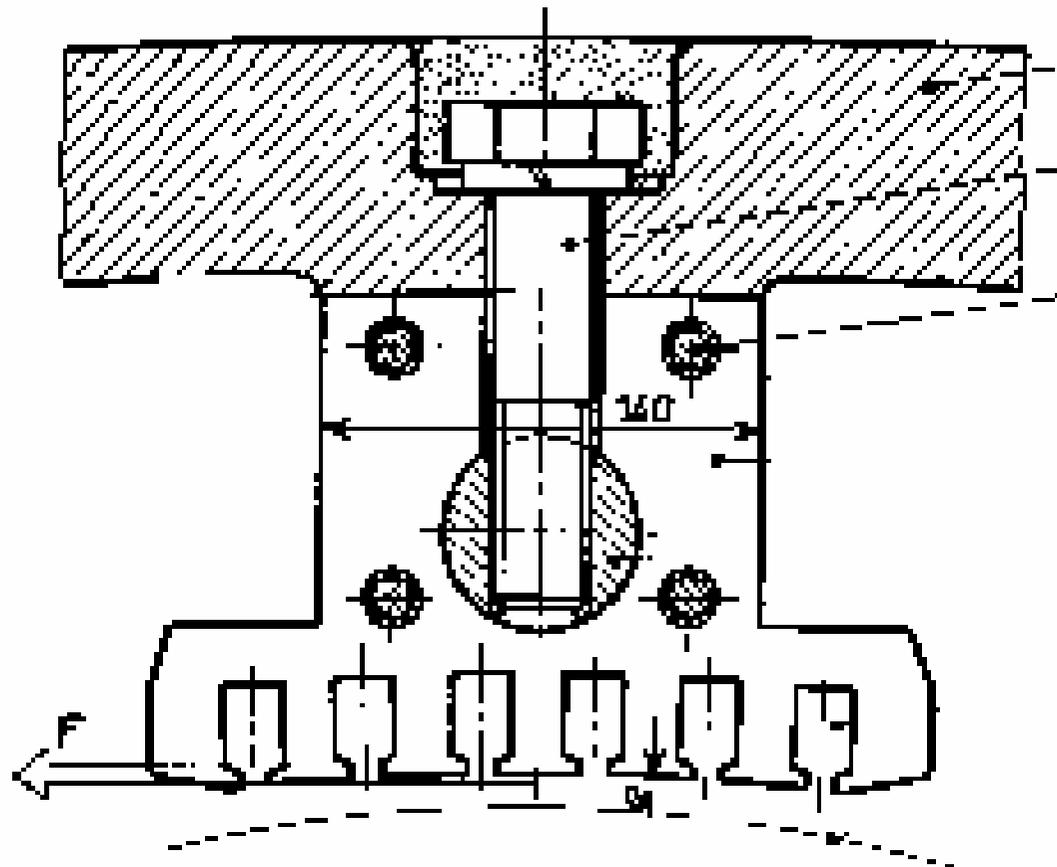
# Compensation de la réaction d'induit

---

n Augmenter l'entrefer (pis aller).

# Compensation de la réaction d'induit

- n Utiliser des pôles avec encoches de compensation.



# Compensation de la réaction d'induit

- n Utiliser des pôles avec enroulement de compensation.

Pôle série "compensé" pour moteur de traction  
*D'après Alsthom*

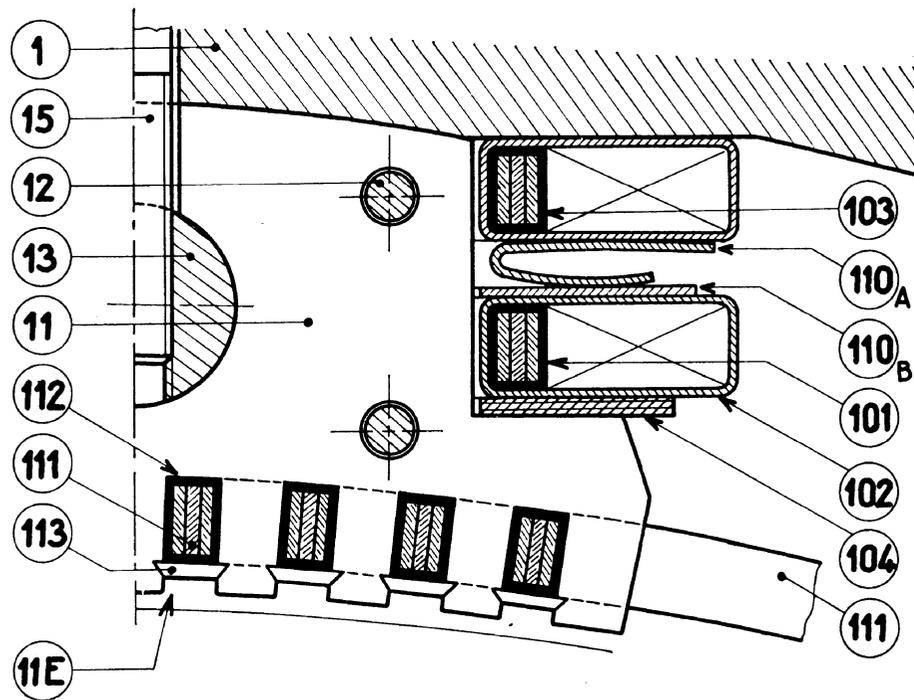


Fig. 23

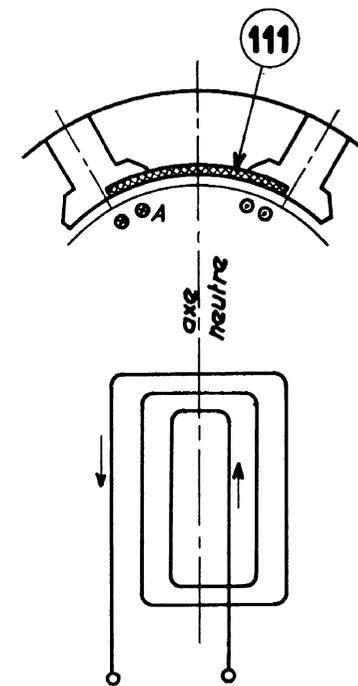
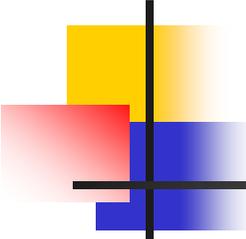


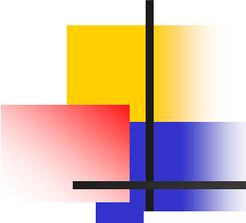
Fig. 24



# F.E.M. : calcul de la F.E.M. théorique

---

- Hypothèse : machine bipolaire  
L'induit comporte  $N$  conducteurs (tous) actifs et tourne à la fréquence de rotation  $n$  (tr/s).



# F.E.M.

---

- Hypothèse : machine bipolaire

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

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

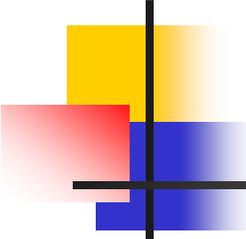
Il est le siège d'une FEM  $e = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \Delta\varphi.N.n$

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

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

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

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



# F.E.M.

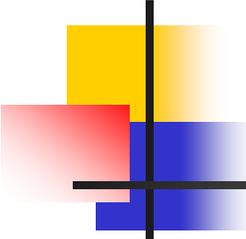
---

- Machine multipolaire

La machine possède

- ✓  $2a$  voies d'enroulements ( $a$  = paire de voie d'enroulement),
- ✓  $2p$  pôles.

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



# Couple électromagnétique

---

$$P_E = E.I = C_E . \Omega;$$

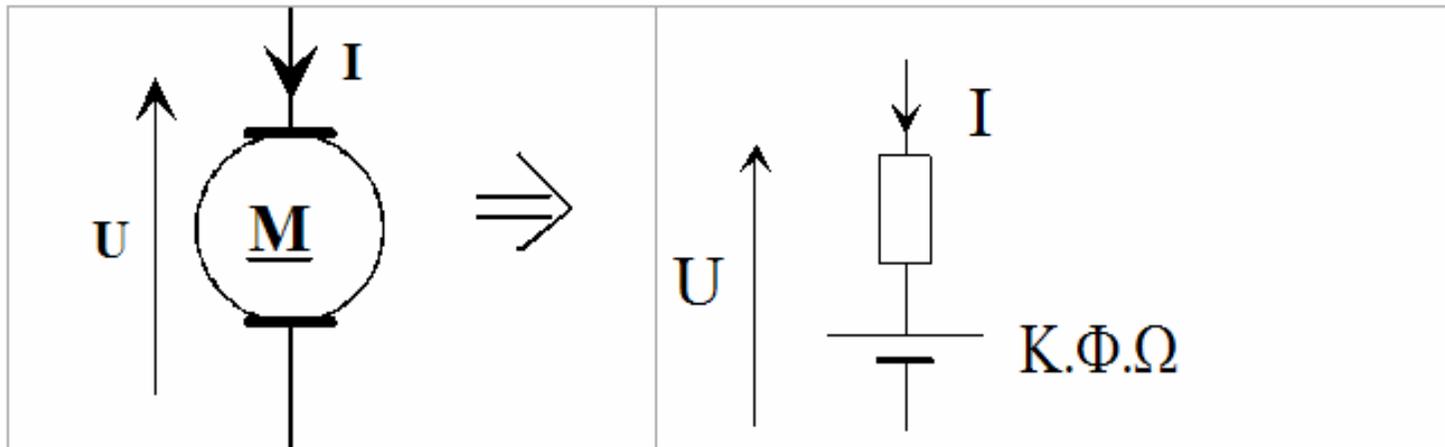
$$C_E = \frac{E.I}{\Omega}$$

$$C = \frac{2p}{2a} \frac{N}{2\pi} \Phi.I = K.\Phi.I$$

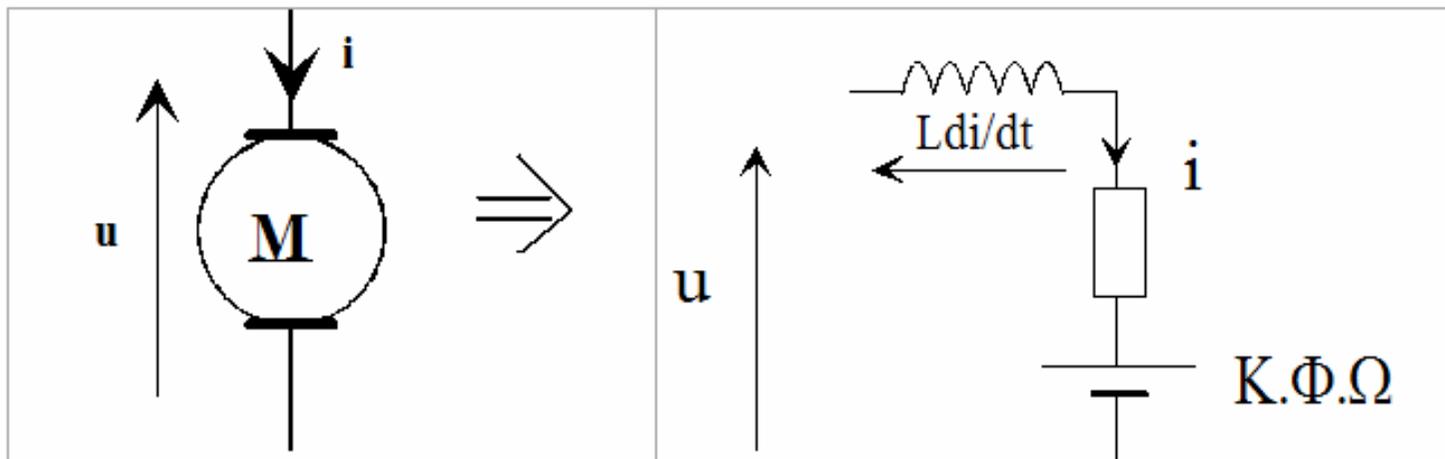
K est appelé constante de FEM et de couple.

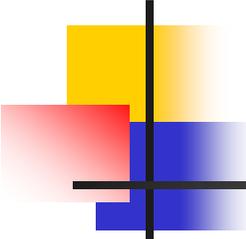
# Modèle électrique de l'induit

## EN REGIME ETABLI



## EN REGIME VARIABLE





# Mode de production du flux

---

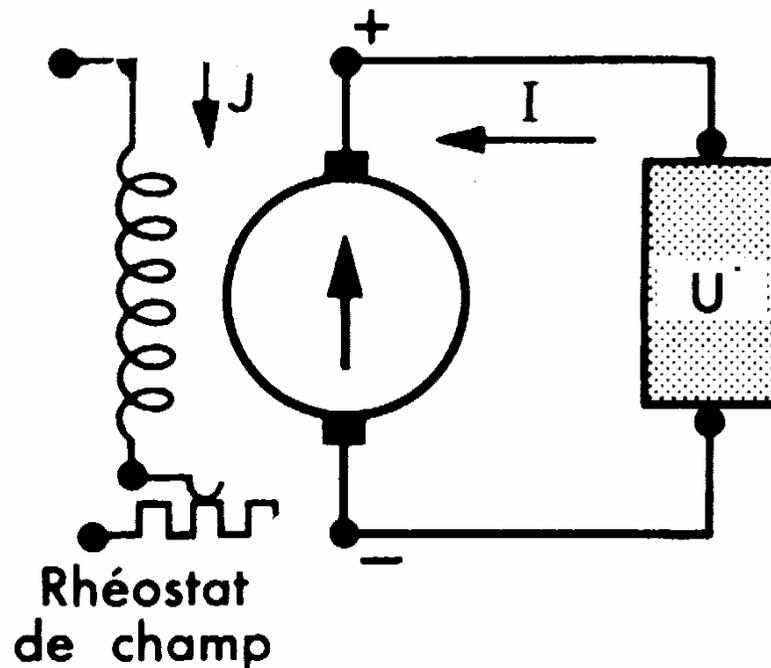
- n Moteur à flux fixe

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

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

# Mode de production du flux

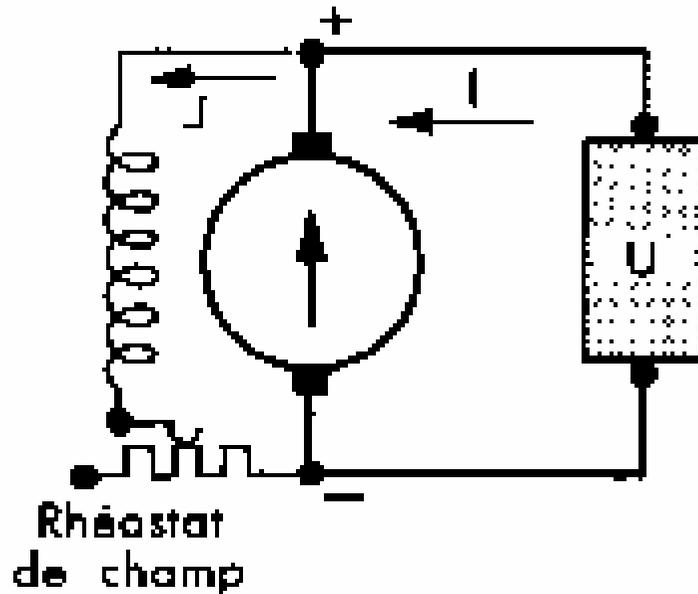
## n Moteur à flux réglable



Moteur à excitation indépendante

# Mode de production du flux

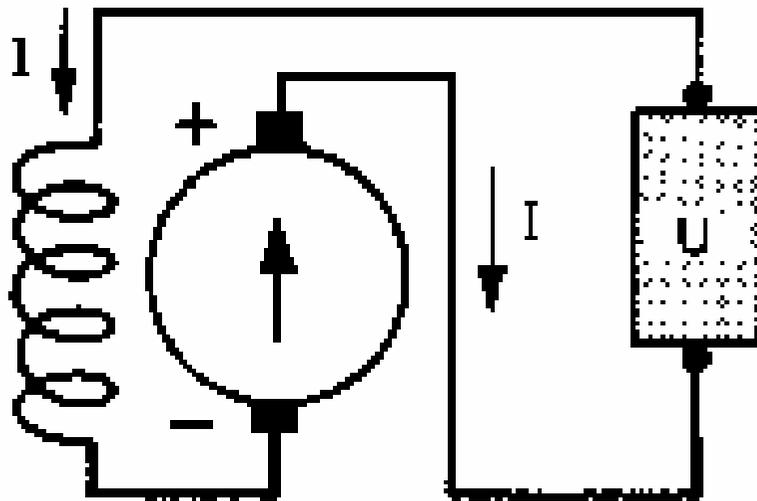
## n Moteur à flux réglable



Moteur à excitation dérivation

# Mode de production du flux

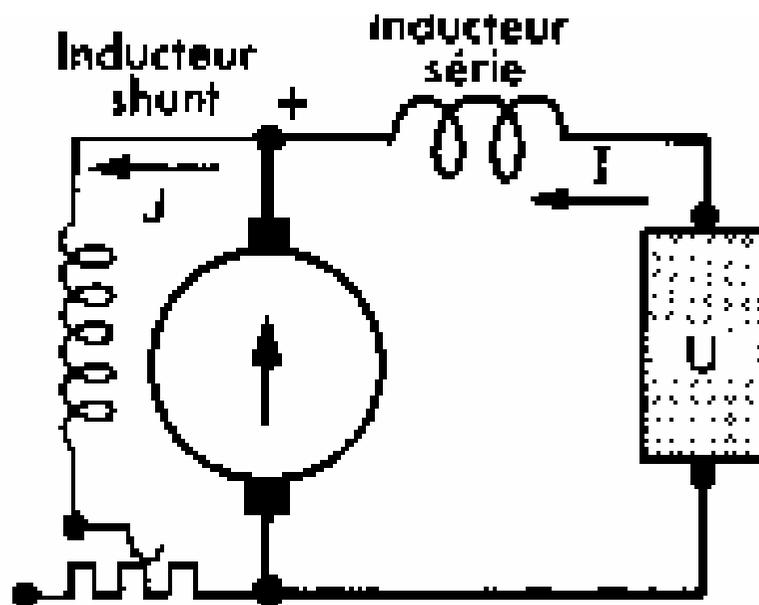
## n Moteur à flux réglable



Moteur à excitation série

# Mode de production du flux

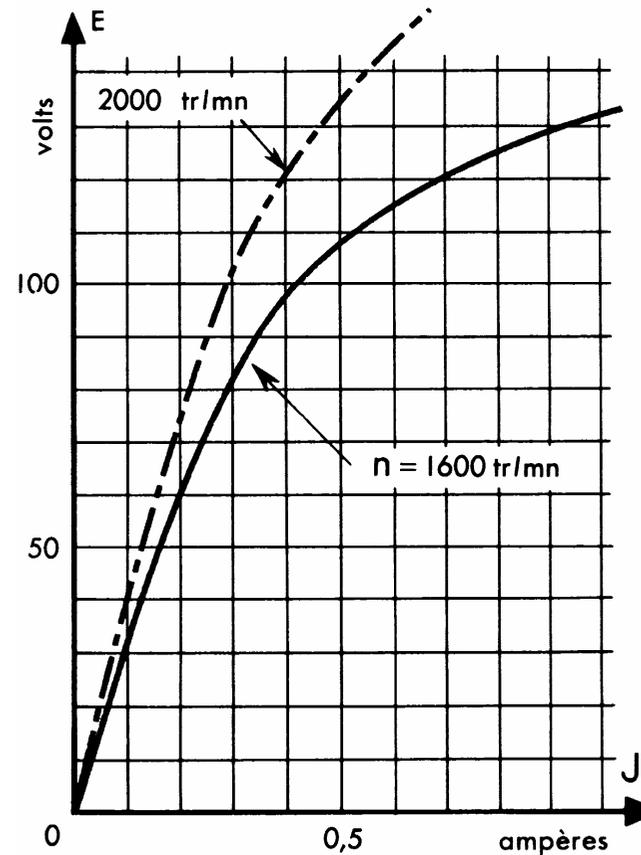
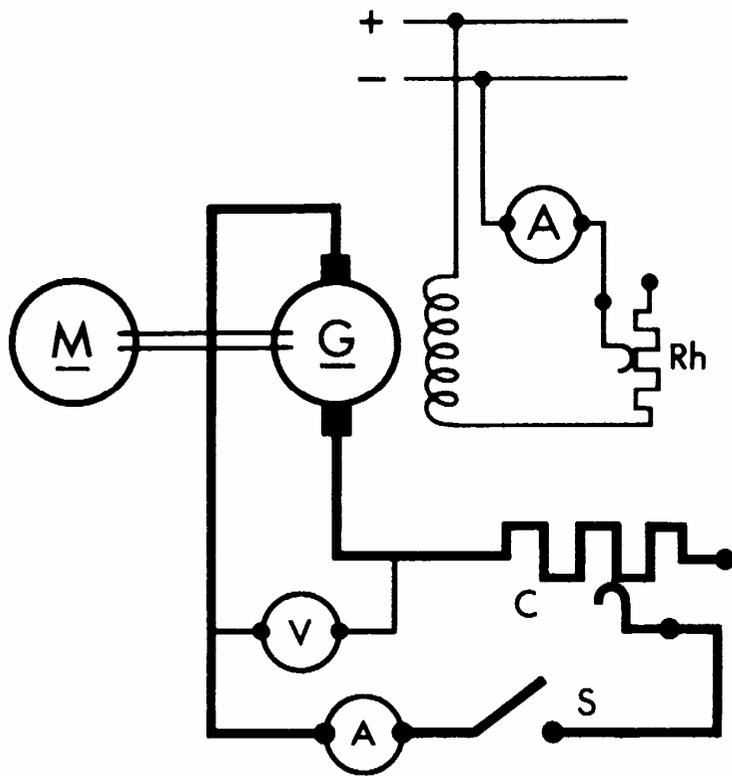
## n Moteur à flux réglable

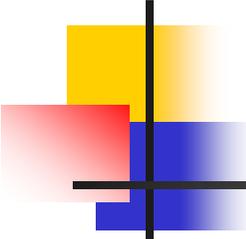


Moteur à excitation composée

# Caractéristiques électriques

- Caractéristiques à vide
  - FEM en fonction de l'excitation

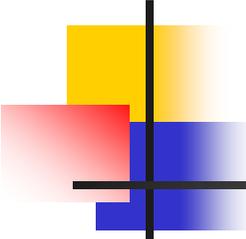




# Caractéristiques électriques

---

- n FEM en fonction de la vitesse
  - n La F.E.M est strictement proportionnelle à la vitesse !



# Caractéristiques électriques

---

## n Caractéristiques en charge

### n Fonctionnement en générateur $U=F(I)$

- n Si la machine est parfaitement compensée c'est un droite de pente  $-r_a$

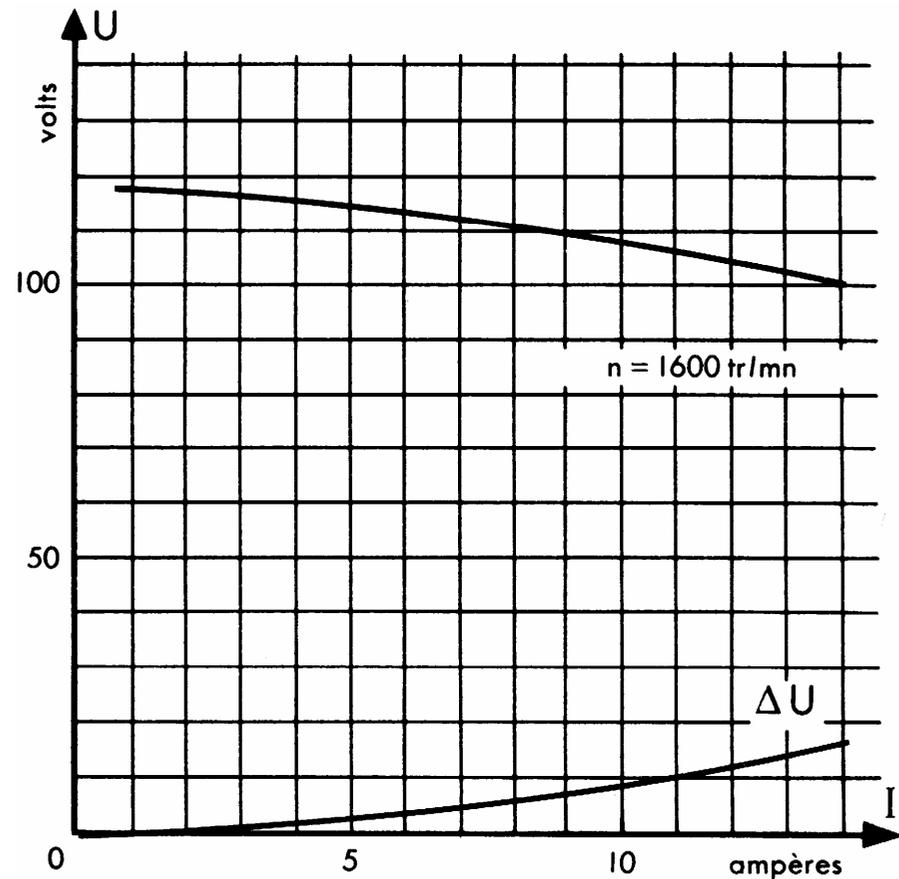
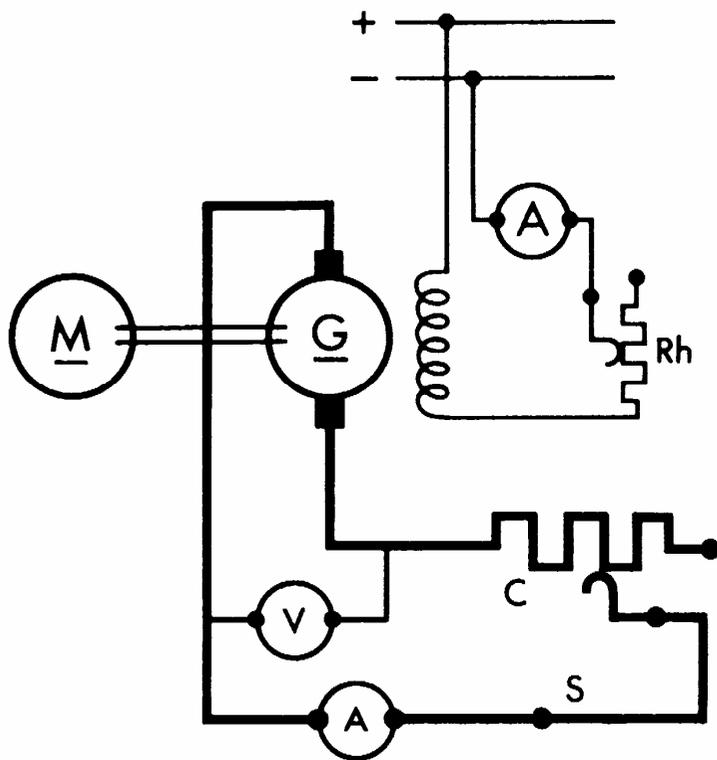
$$U = E - r_a I = K.\Phi.\Omega - r_a I$$

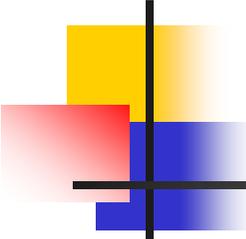
- n Dans le cas contraire  $E$  diminue en fonction de  $I$  (réaction d'induit).

# Caractéristiques électriques

## Caractéristiques en charge

Fonctionnement en générateur  $U(I)$





# Caractéristiques électriques

---

## Caractéristique en moteur Moteur à excitation constante

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

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

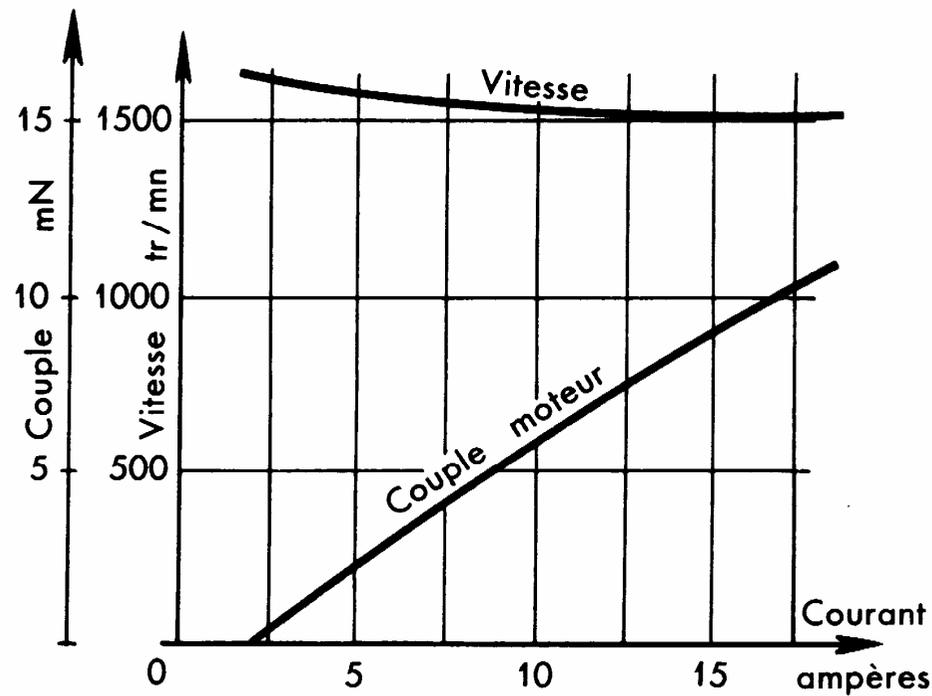
$$C_E = K \cdot \Phi \cdot I$$

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

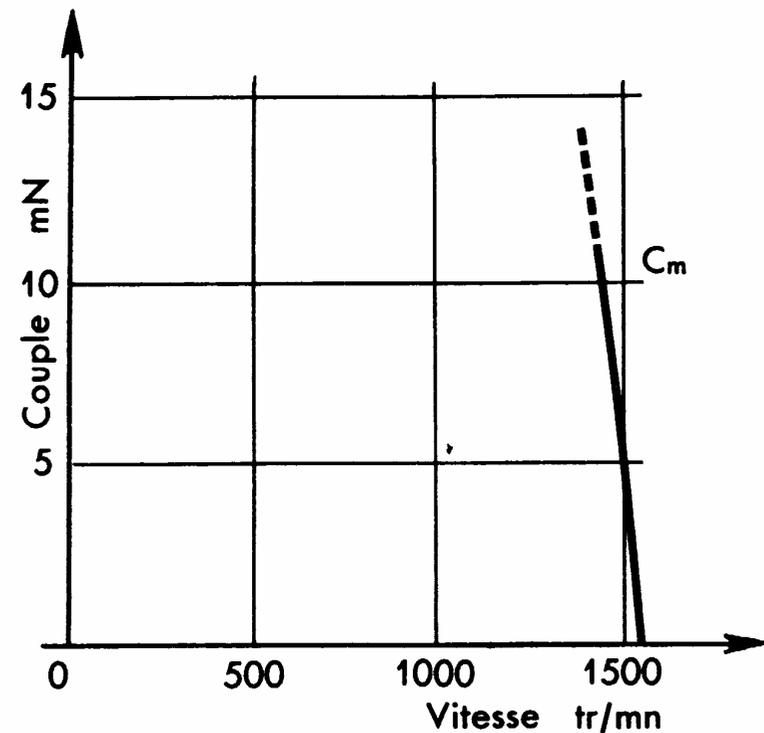
$$C_E = \frac{K \Phi}{r_a} (U - K \cdot \Phi \cdot \Omega)$$

# Caractéristiques électriques

CARACTÉRISTIQUES RÉELLE :  $\Omega = F(I)$ ,  $C = F(I)$ ,  $C = F(\Omega)$



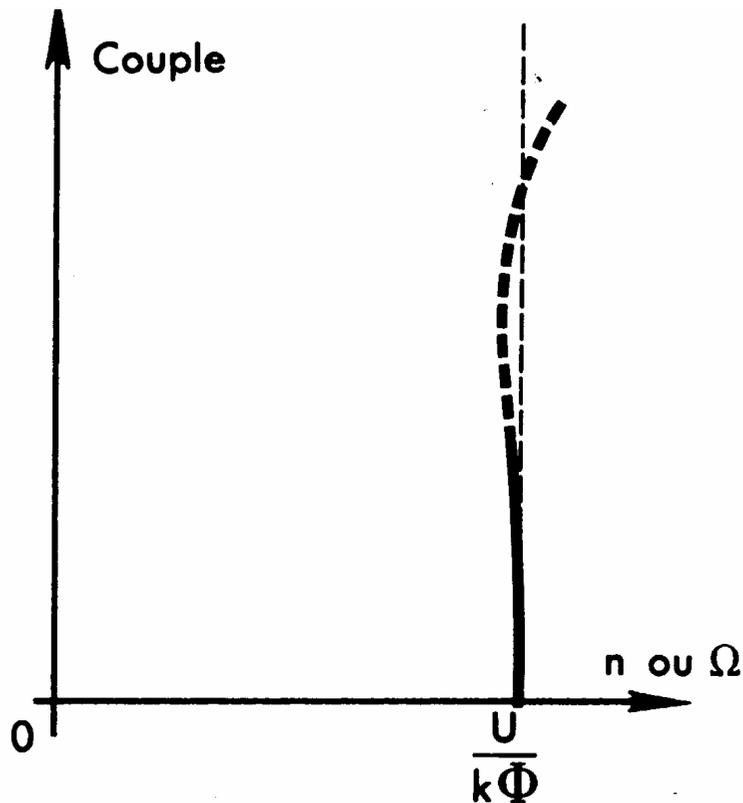
$$N = F(I); C = F(I)$$



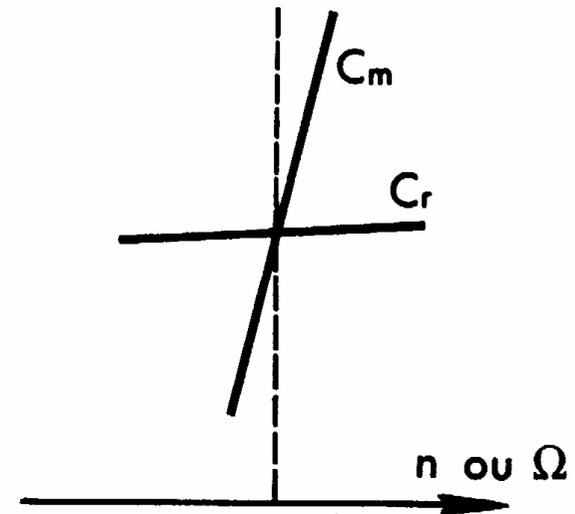
$$C = F(N)$$

# Caractéristiques électriques

## n Stabilité



La caractéristique utile de la machine est en trait plein



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

# Moteur à excitation série

## n Caractéristiques

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

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

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

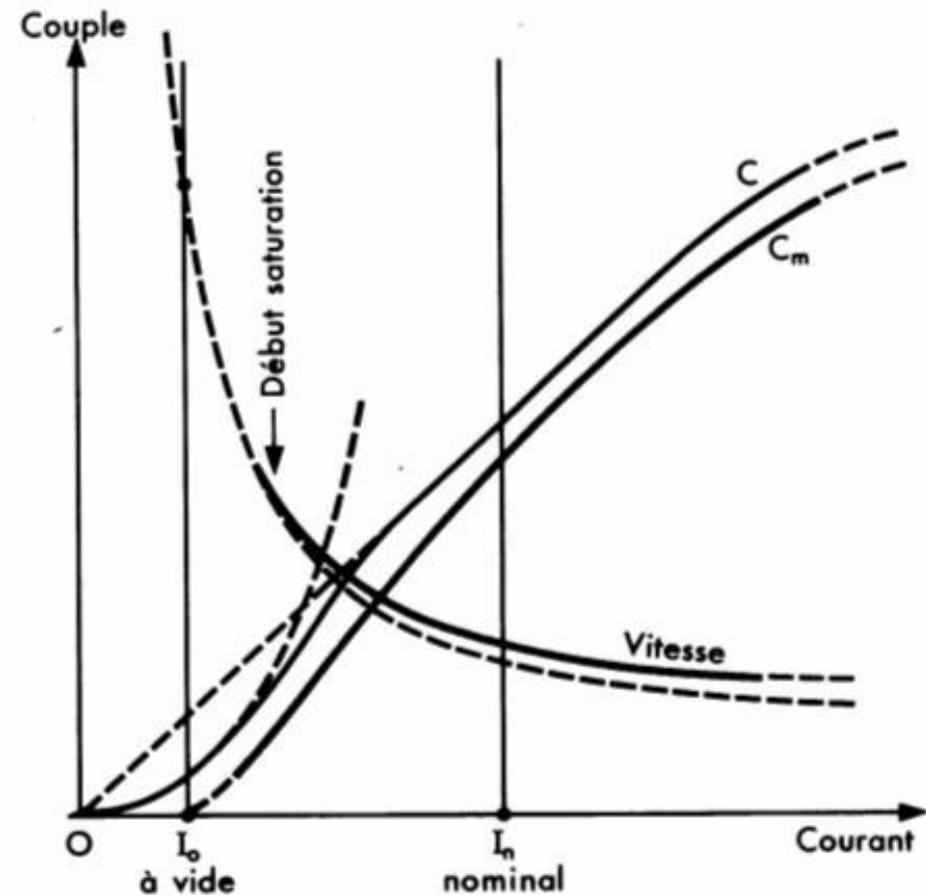
$$\Omega = \frac{U}{A \cdot I}$$

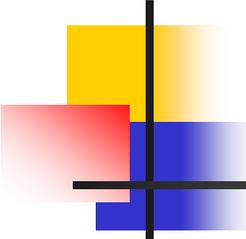
2. Machine saturée : le flux est sensiblement constant  $\Rightarrow$  caractéristiques d'une machine à flux constant.

### PROPRIETES

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

Moteur utilisé en traction électrique et en levage





# Démarrage des moteurs

---

## n Conditions

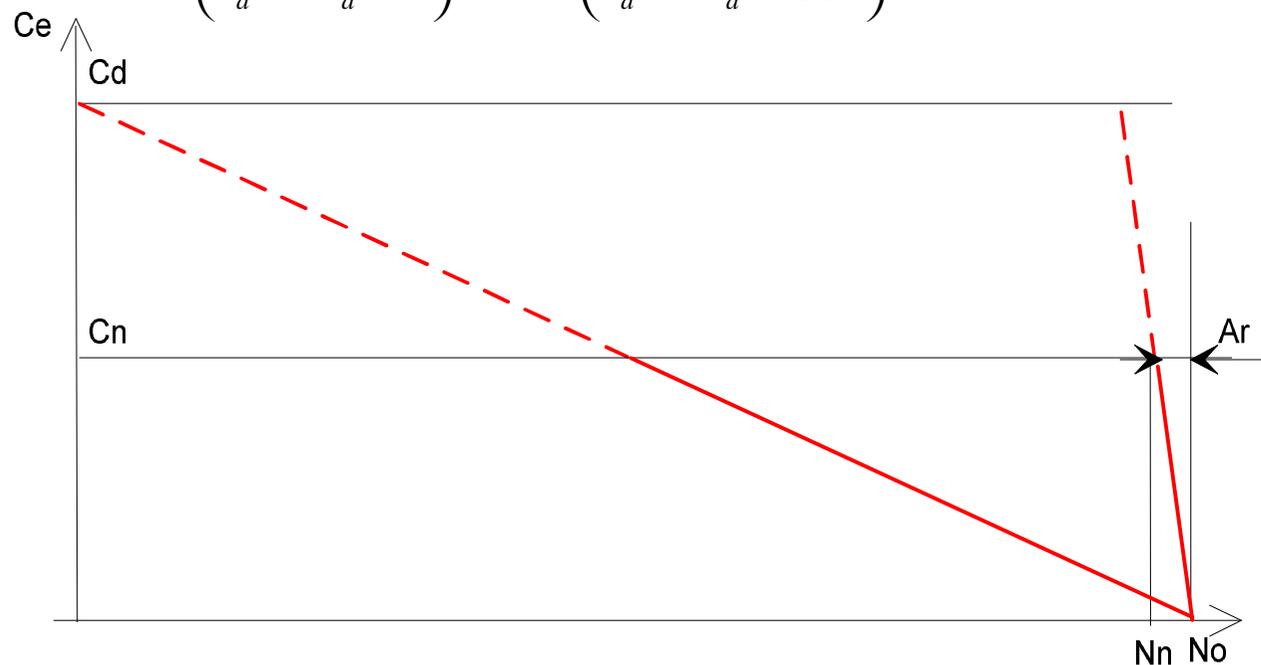
- n A l'arrêt la F.E.M du moteur est nulle : le courant s'établit à la valeur  $I=U/ra$  (valeur destructrice).
- n Pour limiter le courant on peut :
  - n réduire la tension d'induit :
    - n en alimentant le moteur par un générateur de tension variable
    - n en plaçant une résistance en série avec l'induit (rhéostat de démarrage)
    - n en alimentant l'induit avec un générateur à courant constant.

# Calcul d'un rhéostat de démarrage

## n Équation du couple

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

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



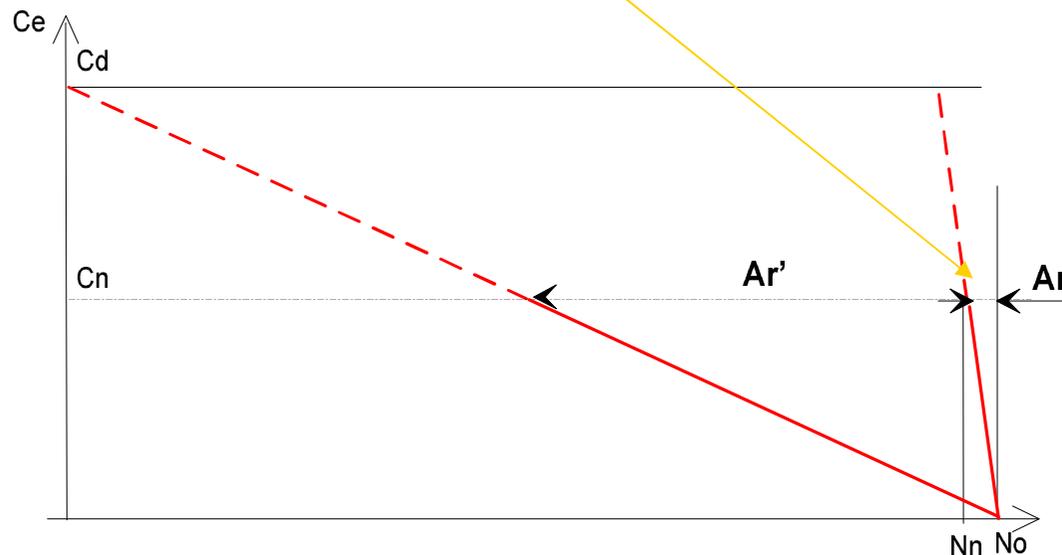
# Calcul d'un rhéostat de démarrage

n Lorsque le couple est nul la vitesse est de :  $\Omega_0 = \frac{U}{K.\Phi}$  et  $N_0 = \frac{30}{p} \frac{U}{K.\Phi}$

n La différence de vitesse entre N0 et NN s'exprime par :  $N_N = \frac{30}{p} \left( \frac{U}{K.\Phi} - \frac{r_a}{K.\Phi} C_N \right)$

n Pour un couple  $C_N$  constant :

$$N_0 - N_N = A.r_a$$

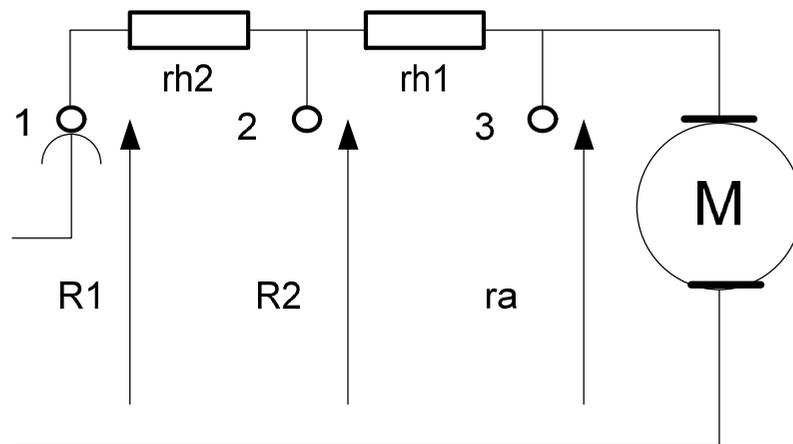
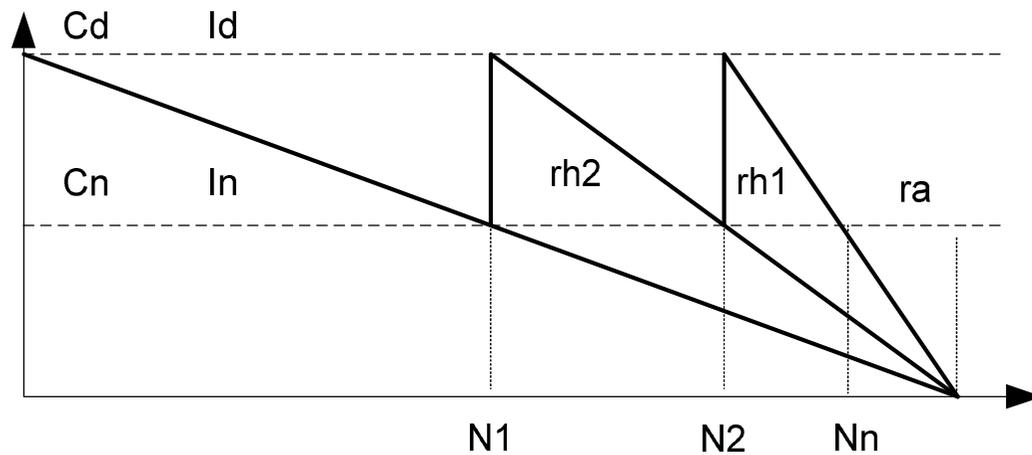
$$N_0 - N_N = \frac{30}{p} \frac{r_a}{(K.\Phi)^2} C_N$$


n La distance  $Ar$  exprime directement la valeur de la résistance de l'induit. Pour  $Ar'$  correspondant à l'insertion d'une résistance  $Rh$

$$\frac{Ar}{r_a} = \frac{Ar'}{rh} \Rightarrow rh = \frac{Ar'}{Ar} r_a$$

# Calcul d'un rhéostat de démarrage

n Méthode graphique :



# Calcul d'un rhéostat de démarrage

## n Méthode algébrique

Hypothèse  $C_d \approx 2C_n$

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

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

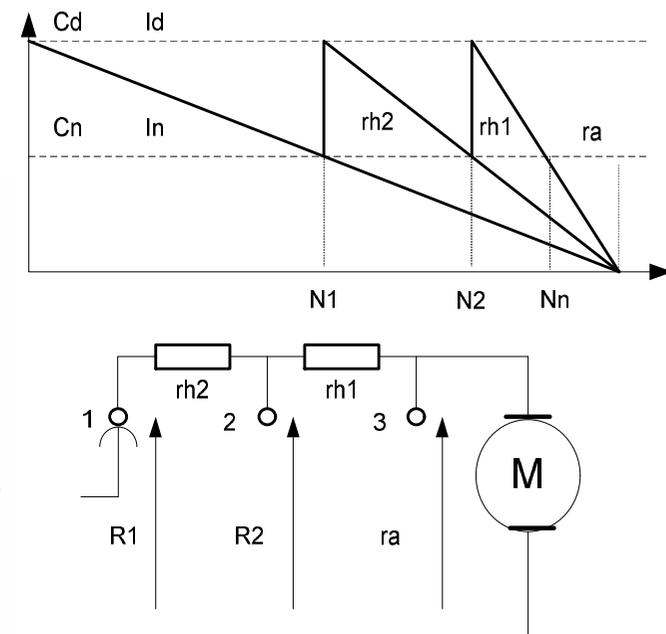
En passant sur le plot 2 pour  $C = C_d \Rightarrow I = I_d$  et  $N = N_2$

$$N_2 = \frac{U - R_2 I_d}{K\Phi} = \frac{U - R_1 I_n}{K\Phi}$$

et

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

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



# Calcul d'un rhéostat de démarrage

## n Méthode algébrique

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

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

de 1<sup>ier</sup> terme  $ra$  et le dernier terme :

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

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

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

Le problème revient à chercher la raison de la progression

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

Finalement on obtient

$ra$

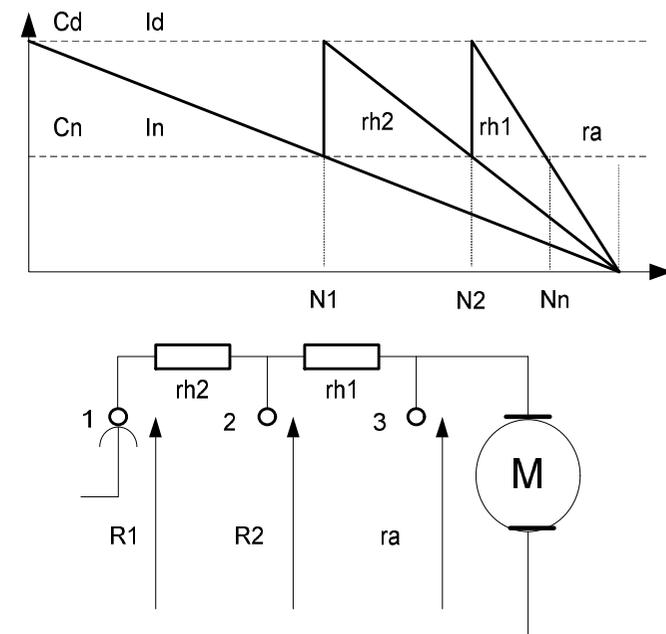
$$R_{n-1} = ra \cdot q$$

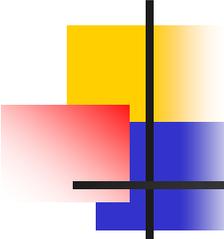
$$R_{n-2} = ra \cdot q^2$$

...

$$R_{n-i} = ra \cdot q^i$$

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



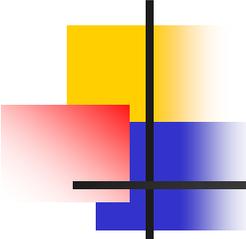


# Calcul d'un rhéostat de démarrage

---

n Exemple

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



# Calcul d'un rhéostat de démarrage

## n Exemple

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

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

On a  $R + r_a = 120/70 = R_1 = 1,71 \Omega$

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

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

Comme  $n$  doit être entier on a

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

La raison de la progression est calculée par

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

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

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

On aura

$$R_a = 0,12 \Omega$$

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

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

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

$$R_1 = 1,71 \Omega$$

$$R_{h1} = 1,71 - 0,876 = 0,834 \Omega$$

$$R_{h1} = 0,876 - 0,442 = 0,434 \Omega$$

$$R_{h1} = 0,434 - 0,233 = 0,209 \Omega$$

$$R_{h1} = 0,233 - r_a = 0,113 \Omega$$

# Variation de vitesse d'une machine à courant continu

## n Principe

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

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

$$C_E = K.\Phi.I$$

- n Pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu on peut :
  - n agir sur le flux à l'aide du courant d'excitation
  - n agir sur la tension d'alimentation de l'induit

# Variation de vitesse par action sur le flux

## n Généralités

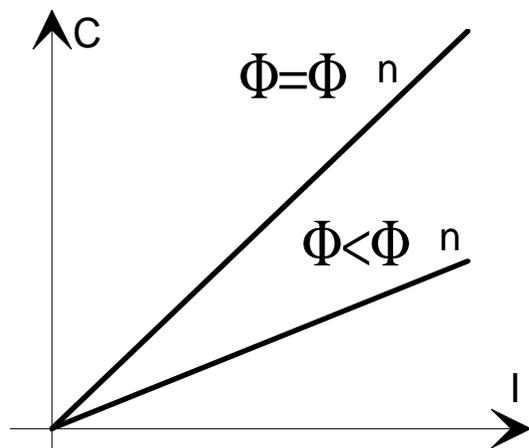
- n Le moteur fonctionnant à flux maximal on ne peut que réduire le flux.
- n Comme  $\Omega \approx \frac{U}{K \cdot \Phi}$  on ne peut qu'augmenter la vitesse (limitée cependant à  $2Nn$  sauf pour des moteurs spéciaux).
- n La puissance consommée par l'excitation est faible devant celle de l'induit (10%), le réglage est simple et économique.

Cependant si  $\Phi$  diminue :

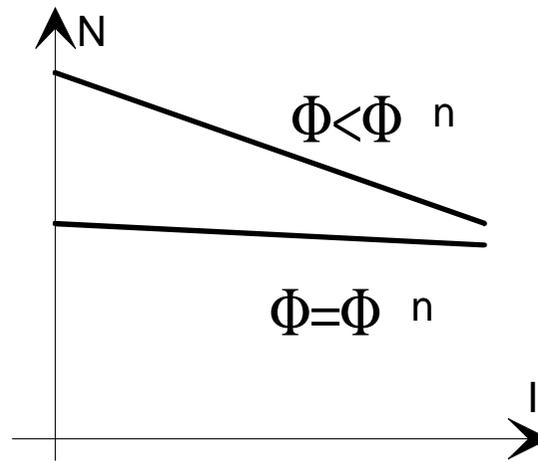
- la réaction d'induit augmente,
- l'intensité du courant reste limitée à la valeur nominale
- $P = E \cdot I = C \cdot \Omega \approx U \cdot I = \text{constant} \Rightarrow C = U \cdot I / \Omega$  :  
le couple diminue lorsque la vitesse augmente

# Évolution des caractéristiques

- Excitation séparée

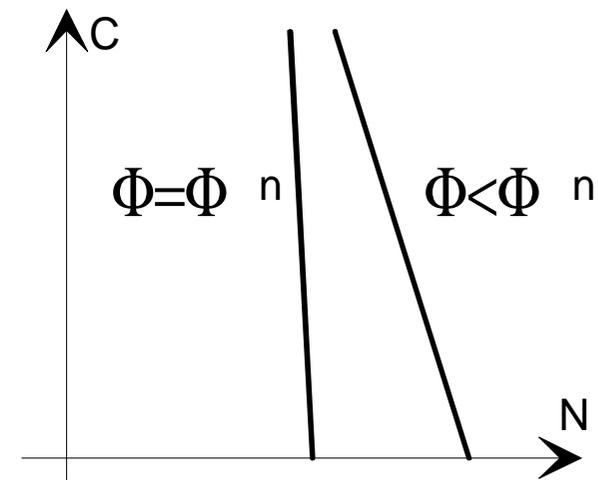


$$C_E = K \cdot \Phi \cdot I$$



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

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



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

# Variation de vitesse par action sur la tension

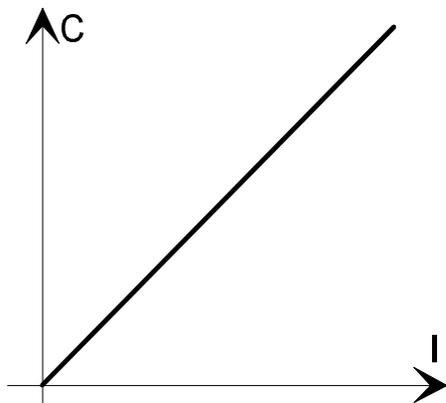
- **Généralités**

La tension ne peut qu'être inférieure à la tension nominale  $\Omega \approx \frac{U}{K.\Phi}$  ;  
on ne peut que diminuer la vitesse.

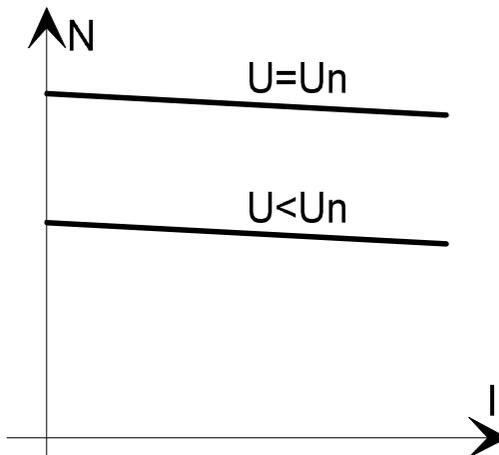
Le réglage de la tension ne peut se faire de façon économique qu'à l'aide d'un variateur de tension.

# Évolution des caractéristiques

- excitation séparée

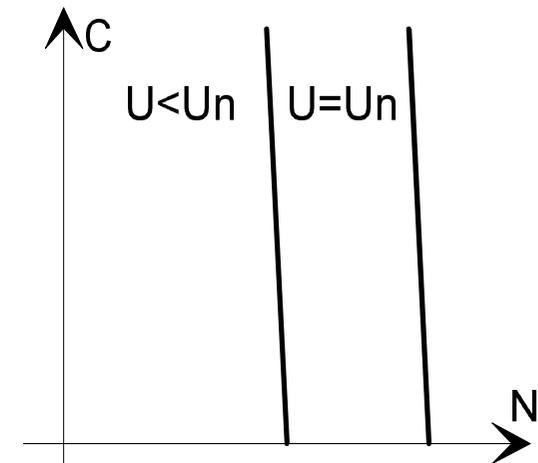


$$C_E = K.\Phi.I$$



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

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



$$C_E = K.\Phi \left( \frac{U}{r_a} - \frac{K.\Phi}{r_a} \Omega \right)$$

# Choix d'un moteur à vitesse variable

Conditions :

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

✓ **Réglage par action sur la tension : valeurs limites**

$$\Phi = \Phi_{MAX}$$

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

$$P = C_n \Omega$$

Le fonctionnement est dit à couple constant et puissance variable.

# Choix d'un moteur à vitesse variable

∨ Réglage par action sur le flux :  
valeurs limites

$$\Phi \leq \Phi_{MAX}$$

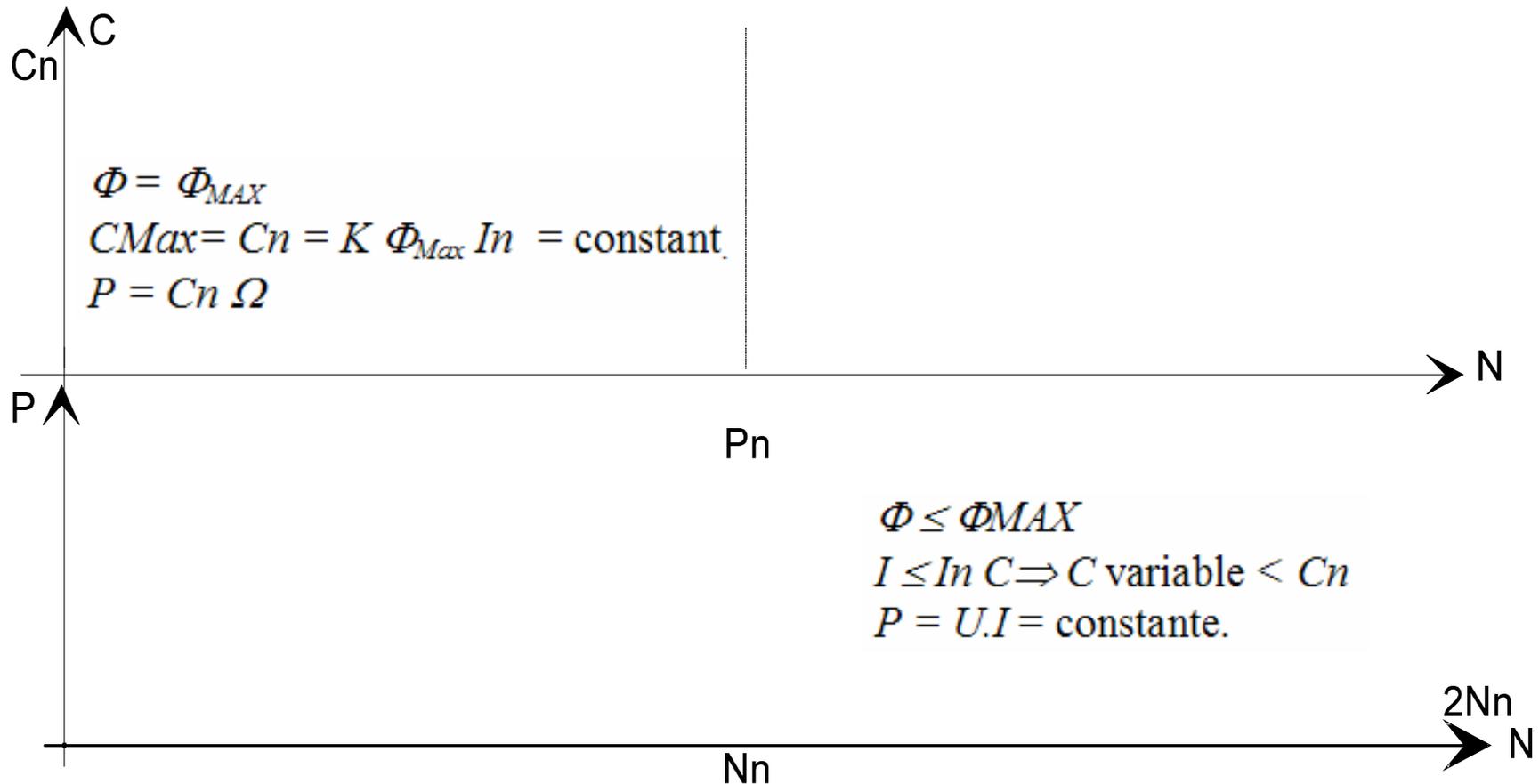
$$I \leq I_n \quad C \Rightarrow C \text{ variable} < C_n$$

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

Le fonctionnement est dit à puissance constante et couple variable.

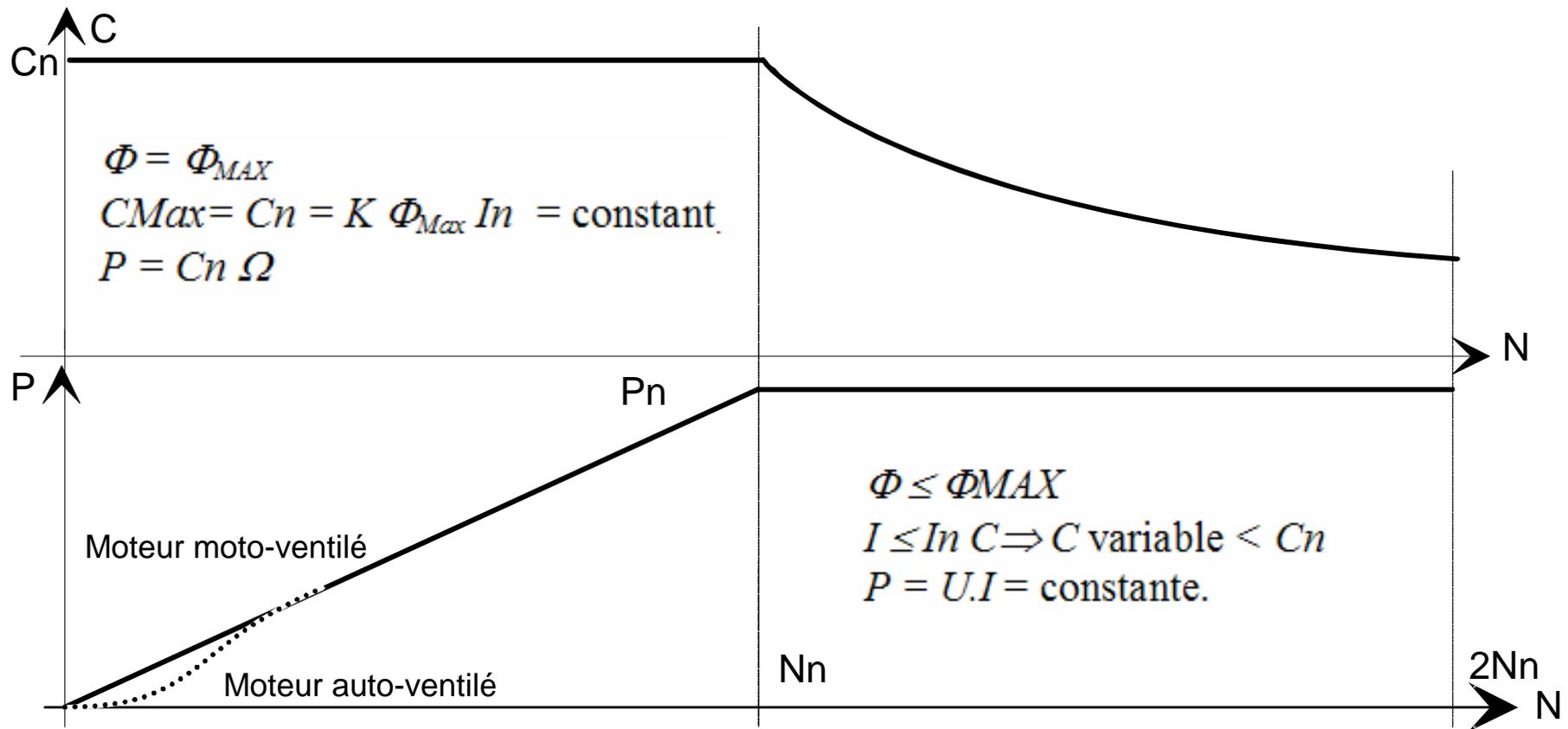
# Choix d'un moteur à vitesse variable

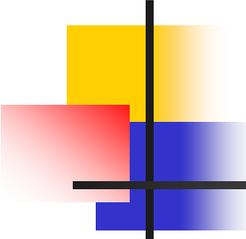
## n Résumé des propriétés



# Choix d'un moteur à vitesse variable

## n Résumé des propriétés





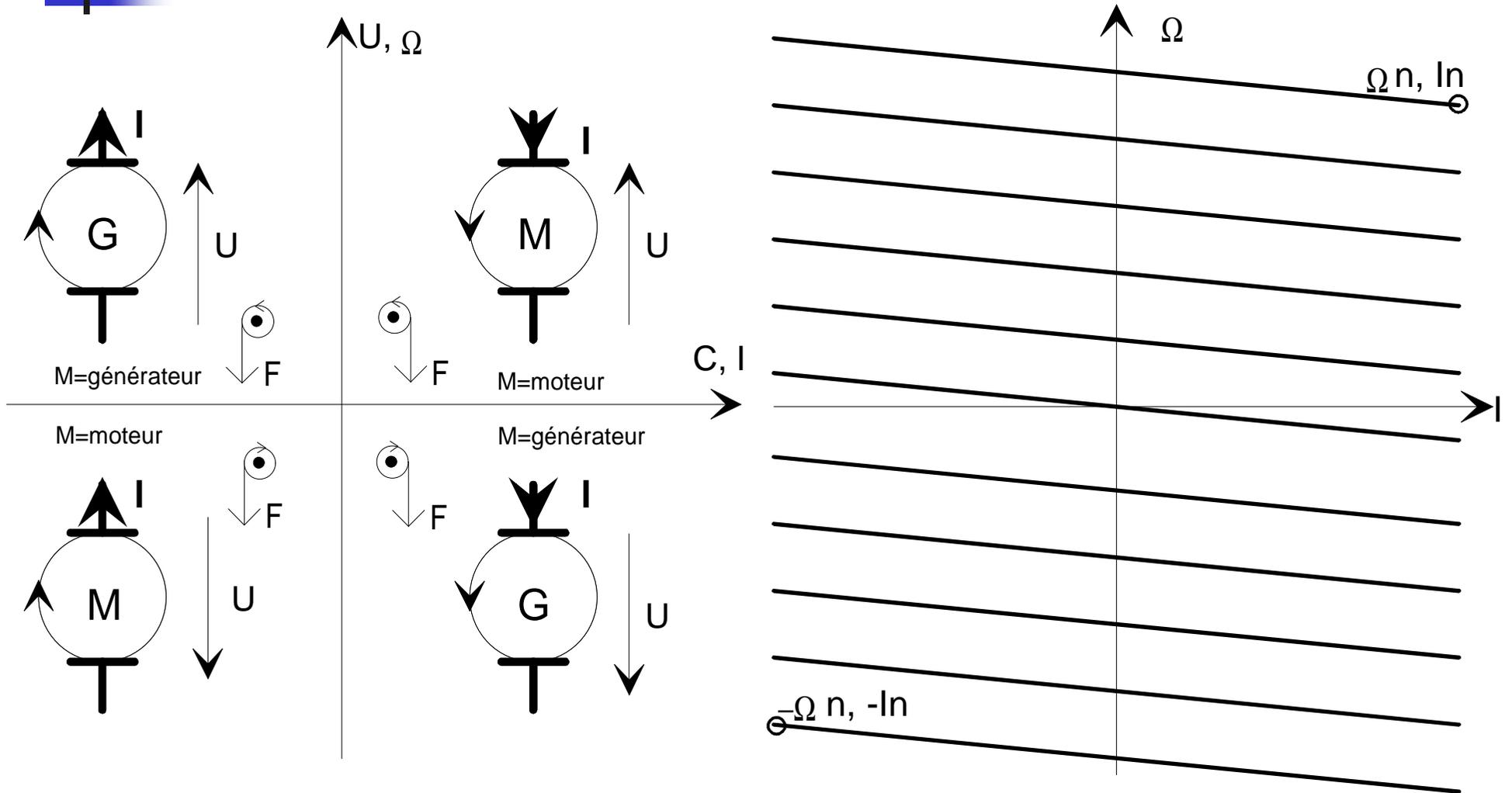
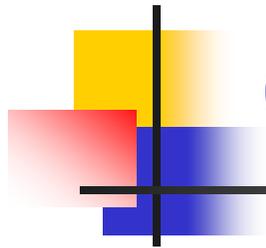
# Choix d'un moteur à vitesse variable

---

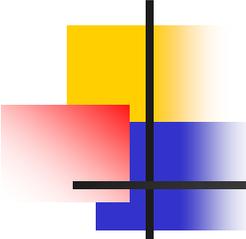
## n Exercice

- n Déterminer les moteurs (  $P_n$ ,  $N_n$  ) capable de fournir :
  - n un couple constant de 32 mN de 200 à 1500 tr/mn
  - n une puissance constante de 5Kw de 100 à 2000 tr/mn
  - n une puissance constante de 5Kw de 500 à 2000 tr/mn

# Quadrants de fonctionnement du moteur

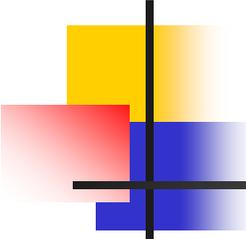


# Freinage des moteurs à courant continu



---

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



# Rendement

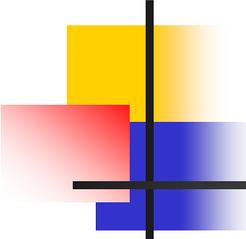
---

## n Définition

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

## n Analyse des pertes

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



# Rendement par la méthode des pertes séparées

---

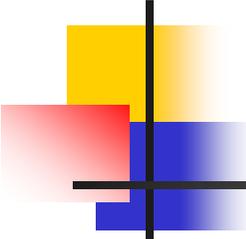
## n Pertes mécaniques

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

n La moteur est alimenté sous une tension d'induit telle que sa vitesse est nominale. On mesure  $P_0$

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

n Ces pertes comportent également les pertes par courant de Foucault



# Rendement par la méthode des pertes séparées

---

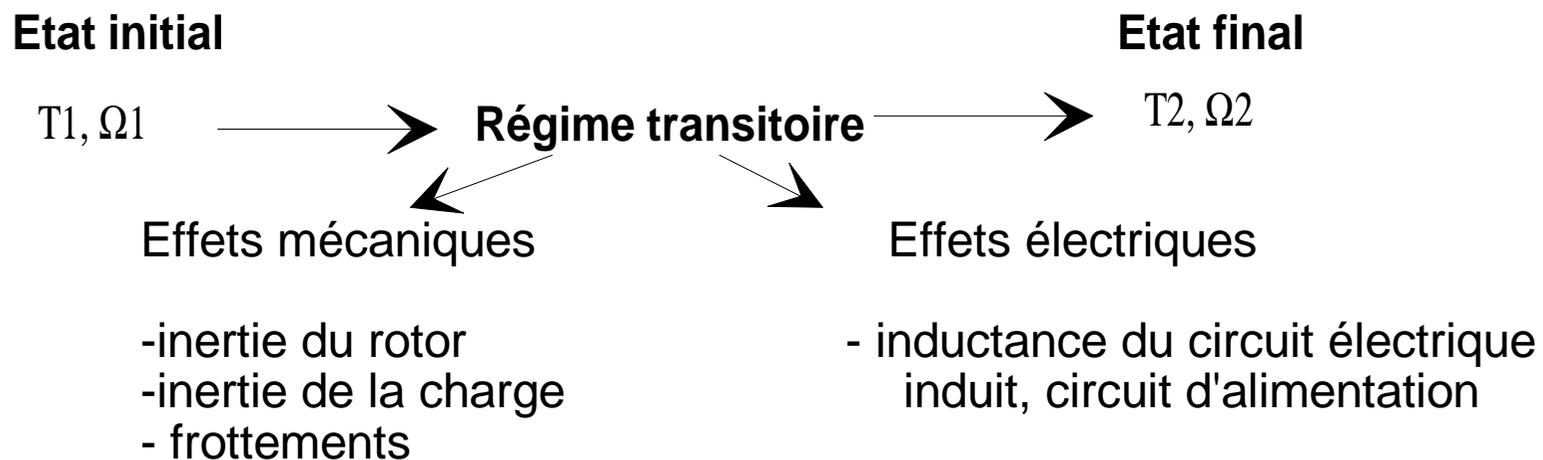
## n Pertes d'excitation

n  $p_{\text{Excitation}} = U_n \cdot i_{d_n}$  (machine à excitation //)

n  $p_{\text{Excitation}} = r_e \cdot I^2$  (machine à excitation série)

# Moteur à courant continu en régime transitoire

## n Équations électromécaniques du moteur



# Moteur à courant continu en régime transitoire

n Le RT est régi par deux équations

n Une équation mécanique

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

$$C_M = K.I$$

$C_R$  est fonction du type de charge. Généralement

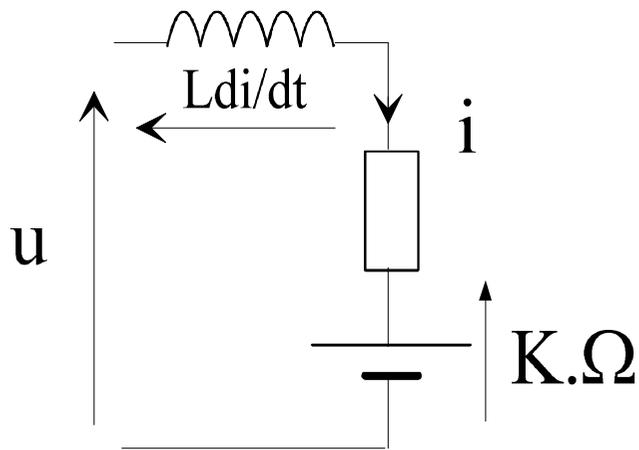
$$C_r = T_f + K_v.\Omega$$

$T_f$  couple de frottement sec indépendant de  $\Omega$

$K_v.\Omega$  couple de frottement sec proportionnel à  $\Omega$

# Moteur à courant continu en régime transitoire

n Une équation électrique



$$u = L \frac{di}{dt} + r.i + K.\Omega$$

# Moteur à courant continu en régime transitoire

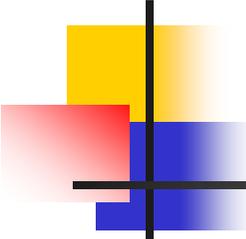
- n Les équations précédentes peuvent également être écrites pour le régime harmonique

- n Équation mécanique

$$j\omega.\Omega.J = \underline{C}_M - \underline{C}_R$$

- n Équation électrique

$$\underline{u} = j\omega.L.\underline{i} + r.\underline{i} + K.\underline{\Omega}$$



# Moteur à courant continu en régime transitoire

---

## n Exercice 1

### n Hypothèses :

- n moteur alimenté sous tension constante,
- n la charge présente un couple de frottements sec et visqueux.

n Établir l'équation différentielle liant la vitesse à la tension d'alimentation de l'induit

n Établir l'équation harmonique liant la vitesse à la tension d'alimentation de l'induit

## n Exercice 2

### n Hypothèses :

- n moteur alimenté par un générateur de courant constant
- n la charge présente un couple de frottements sec et visqueux.

n Établir l'équation différentielle liant la vitesse à la tension d'alimentation de l'induit

n Établir l'équation harmonique liant la vitesse à la tension d'alimentation de l'induit