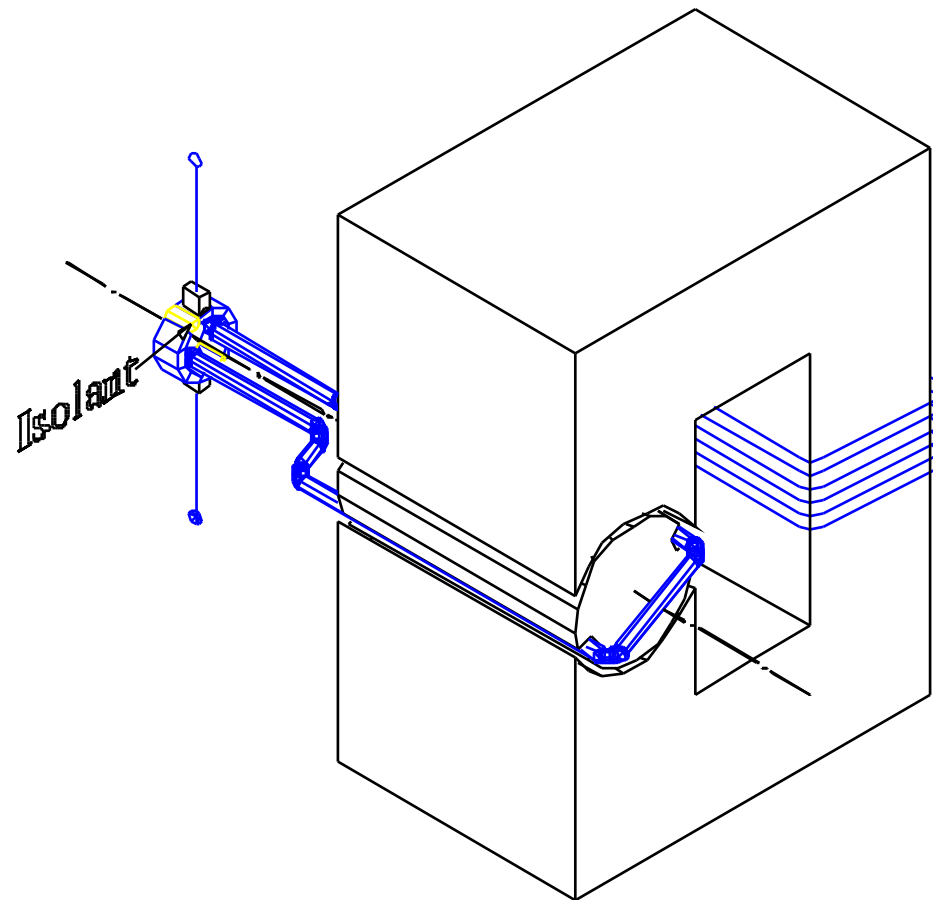


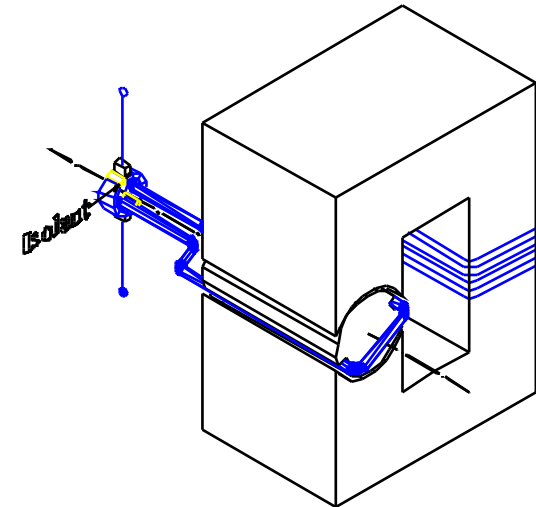
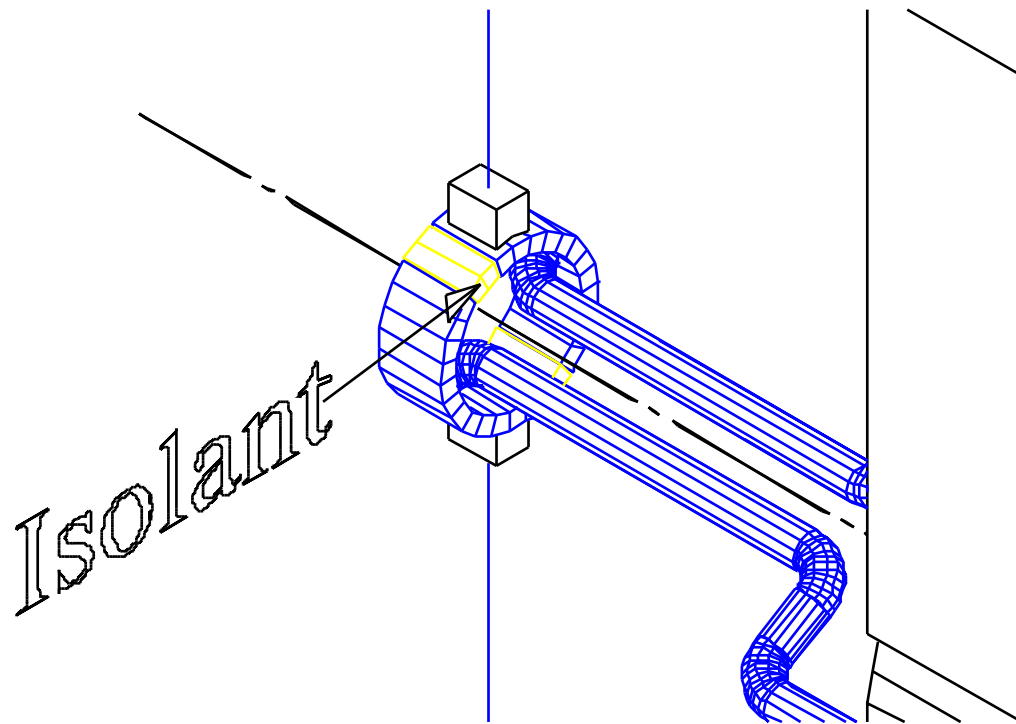
Chapitre 4 : LA MACHINE A COURANT CONTINU

- ▶ 1. Génération d'une tension continue
- ▶ 2. Influence du courant d'armature
- ▶ 3. Modèles mathématiques - Schémas équivalents
- ▶ 4. Courbes caractéristiques des génératrices
- ▶ 5. Courbes caractéristiques des moteurs
- ▶ 6. Moteurs particuliers

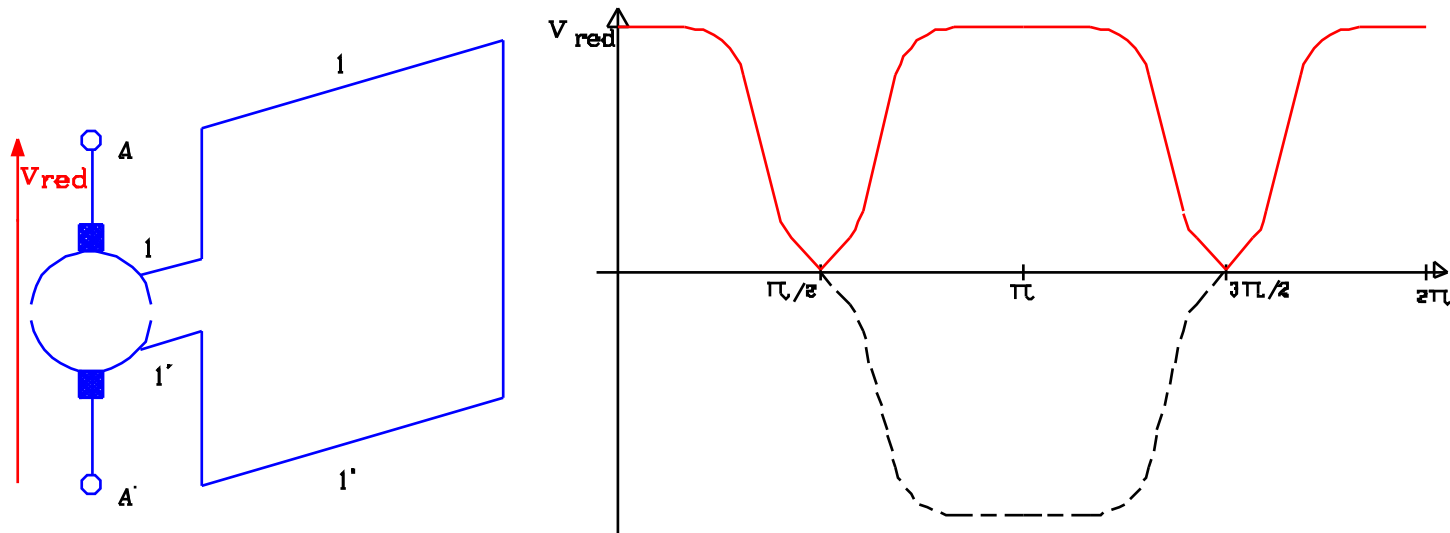
Machine à courant continu



Systeme balais-collecteur



Effet redresseur du collecteur



Stator - inducteur à pôles saillants

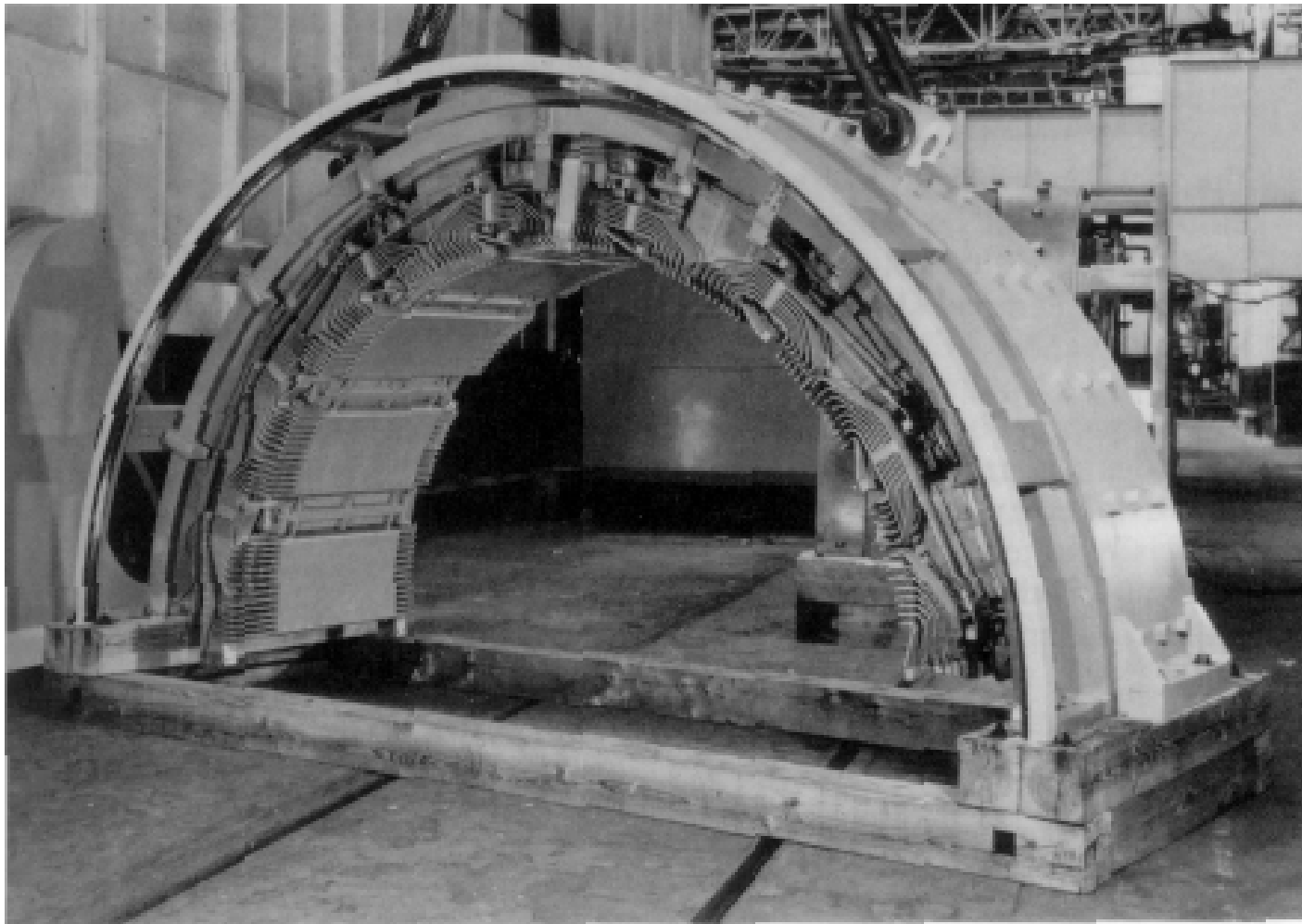


Figure 6.3 Typical large d.c. frame. (Courtesy: GEC Large Machines Ltd)

Rotor - induit - collecteur

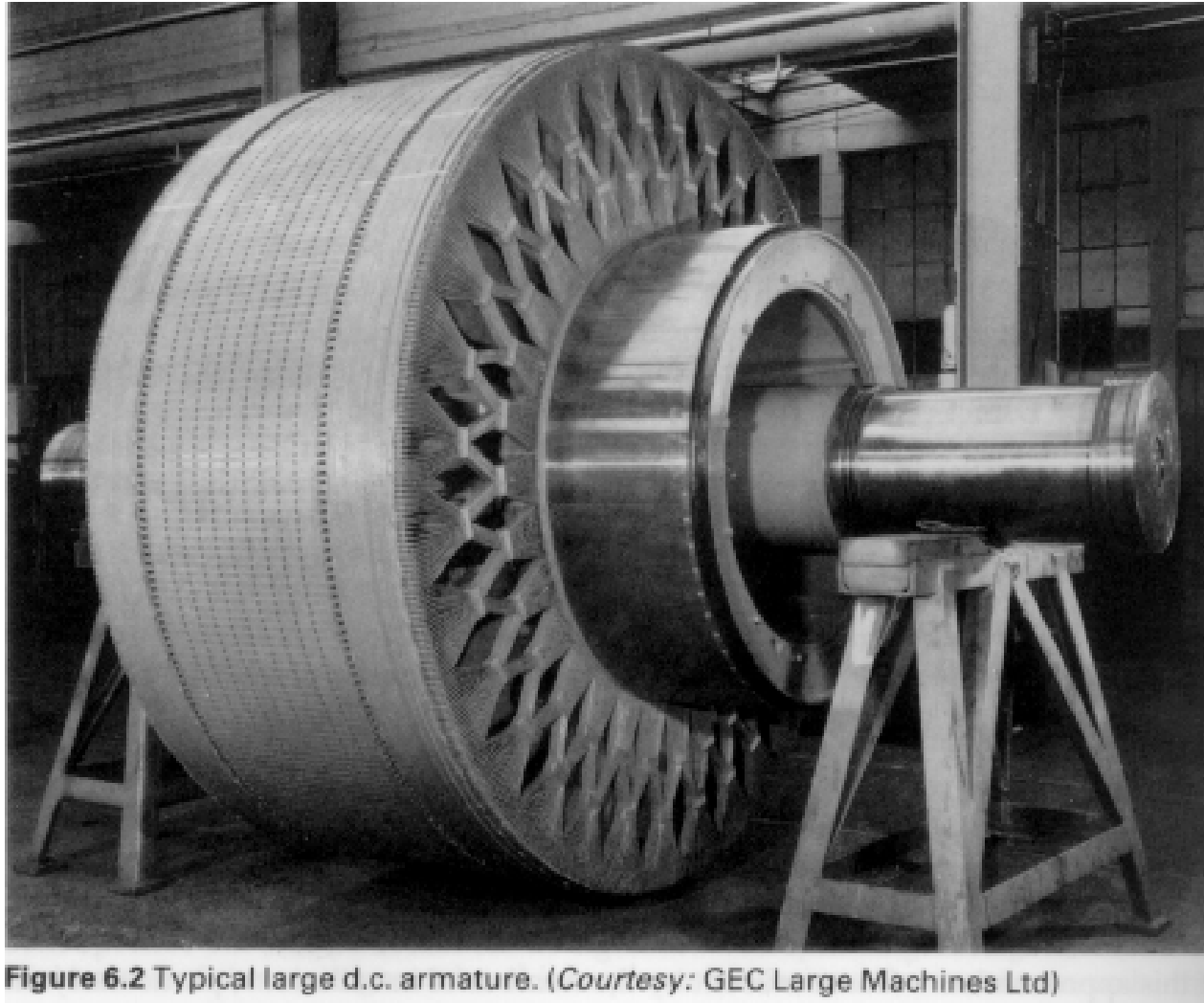


Figure 6.2 Typical large d.c. armature. (Courtesy: GEC Large Machines Ltd)

Machine à courant continu

Constitution

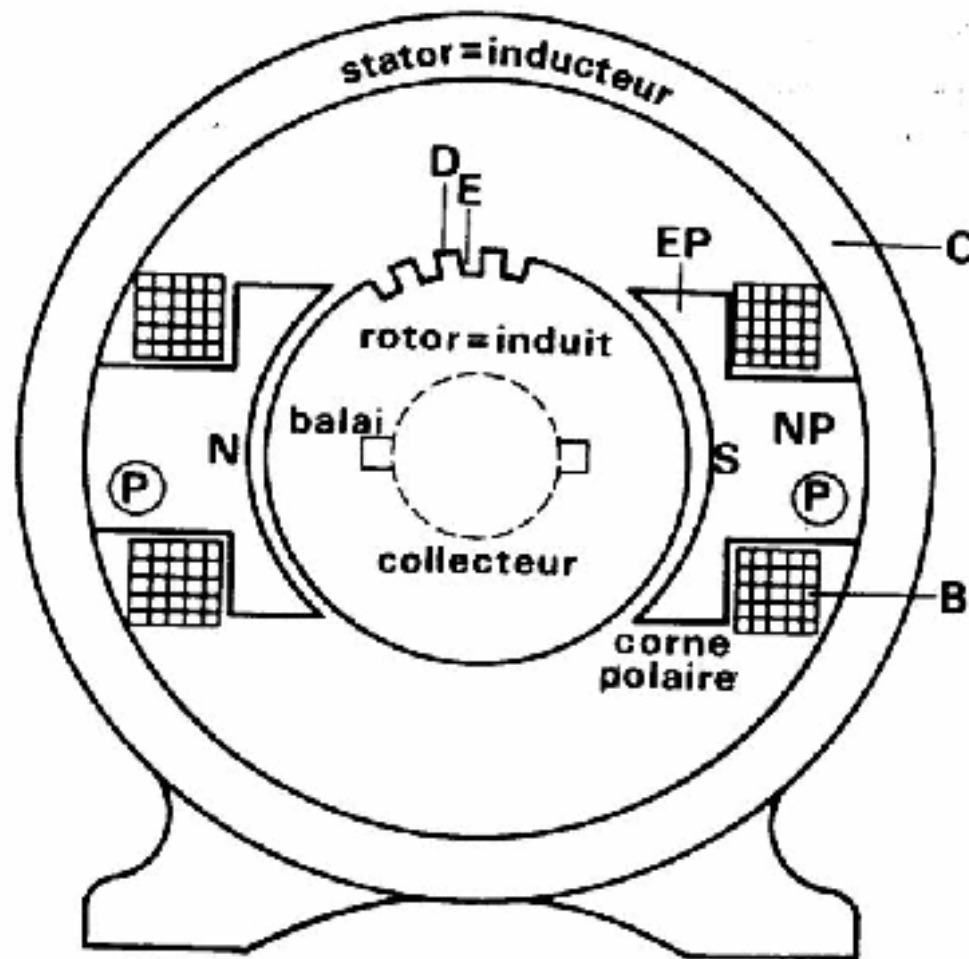
C : Carcasse

P : Pôles

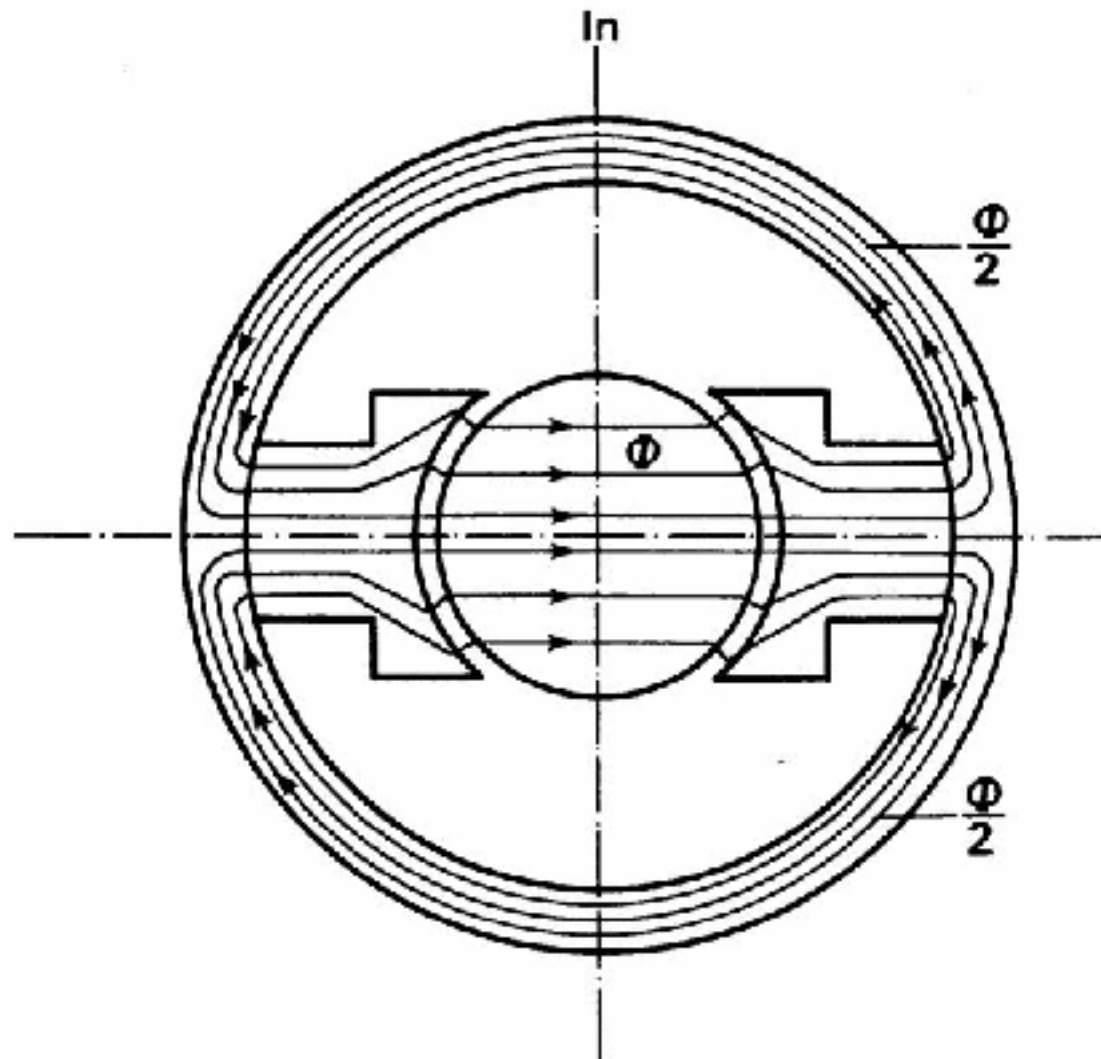
D : Denture

E : Encoche

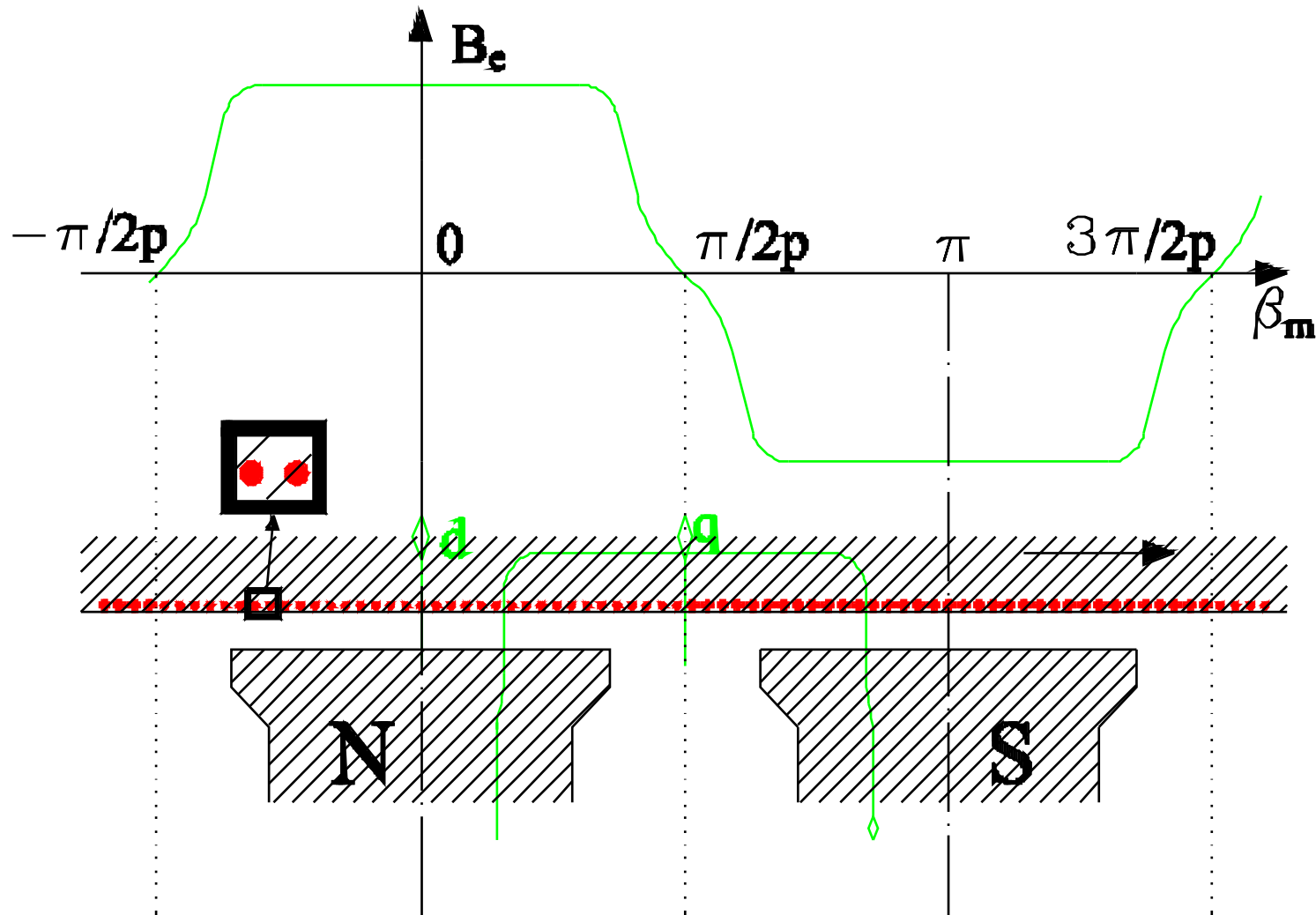
B : Bobine



Machine bipolaire - Flux inducteur



Principe de la dynamo



Induit - enroulement en tambour

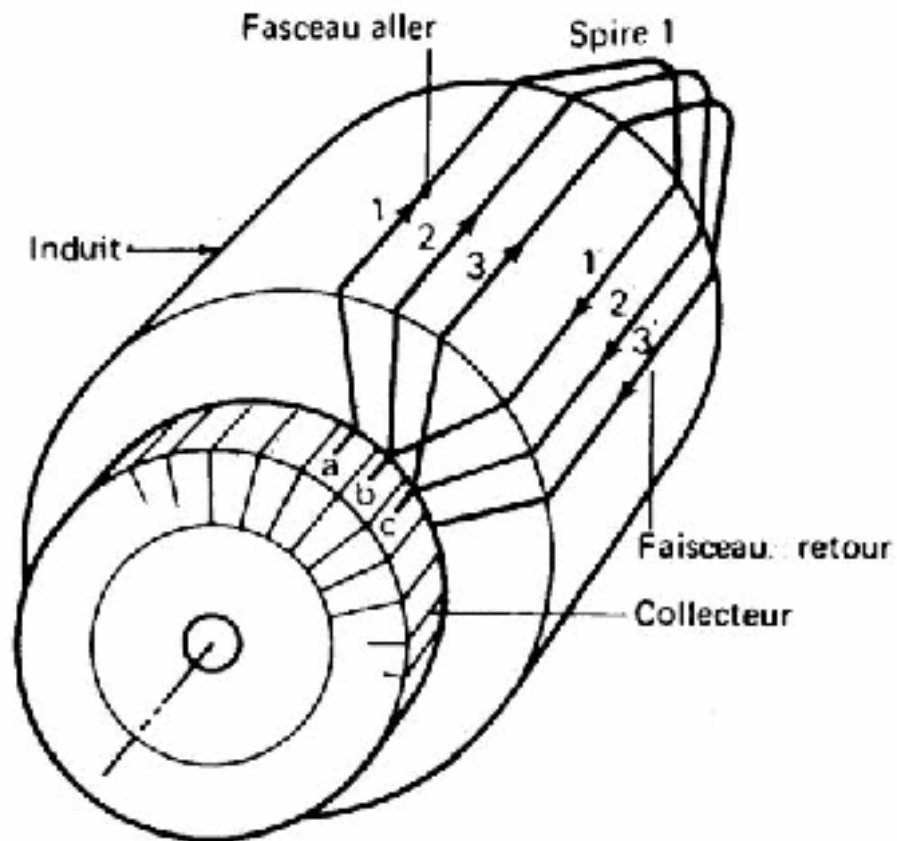
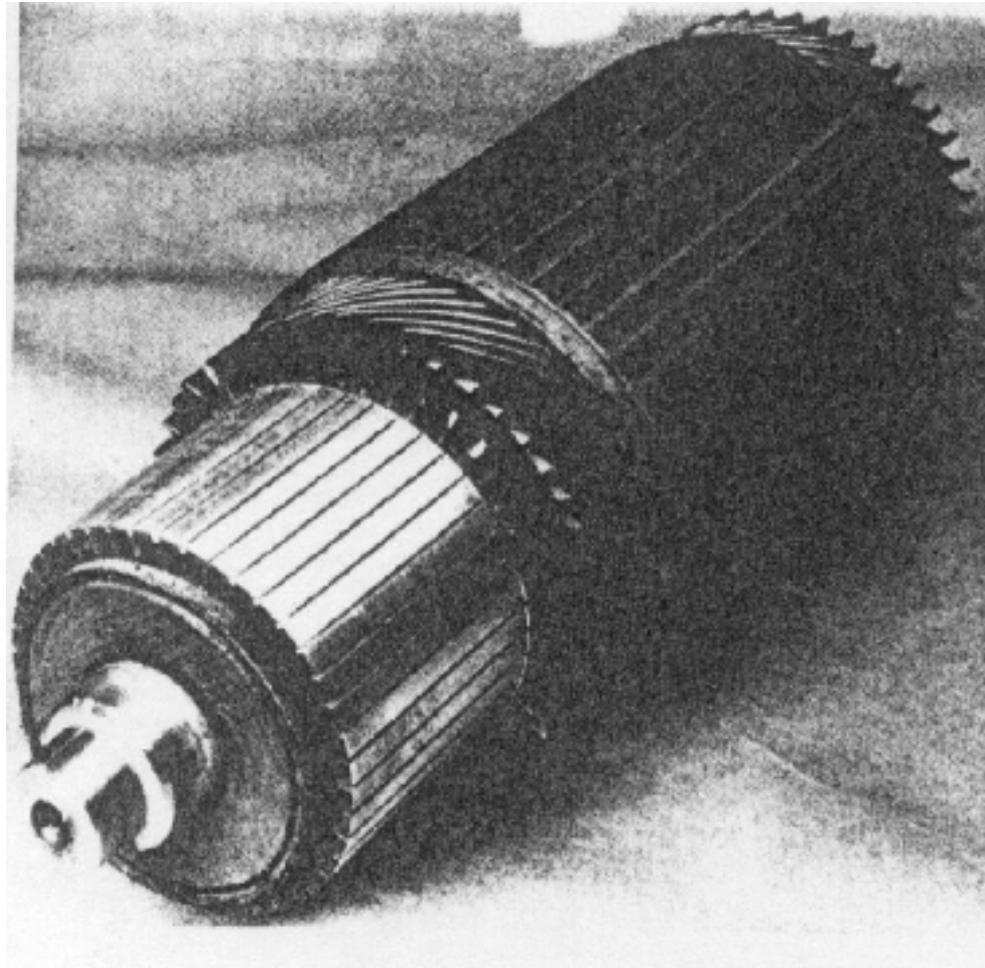


Fig. 10

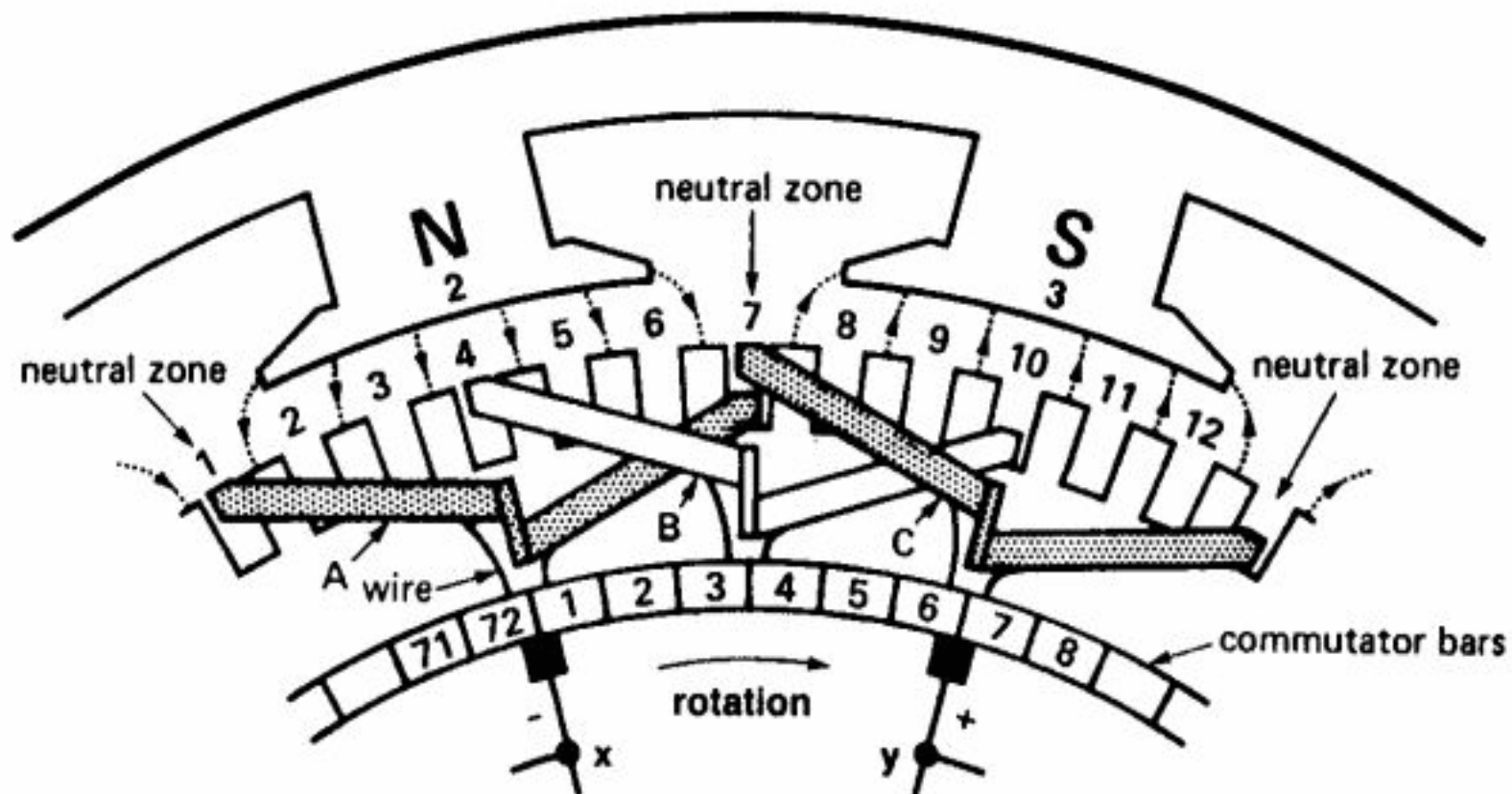
Induit - collecteur



Collecteur



Raccordement spire - lame du collecteur



Machine multipolaire de Gramme

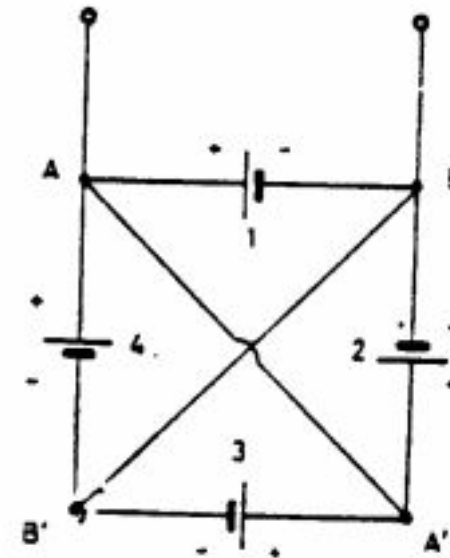
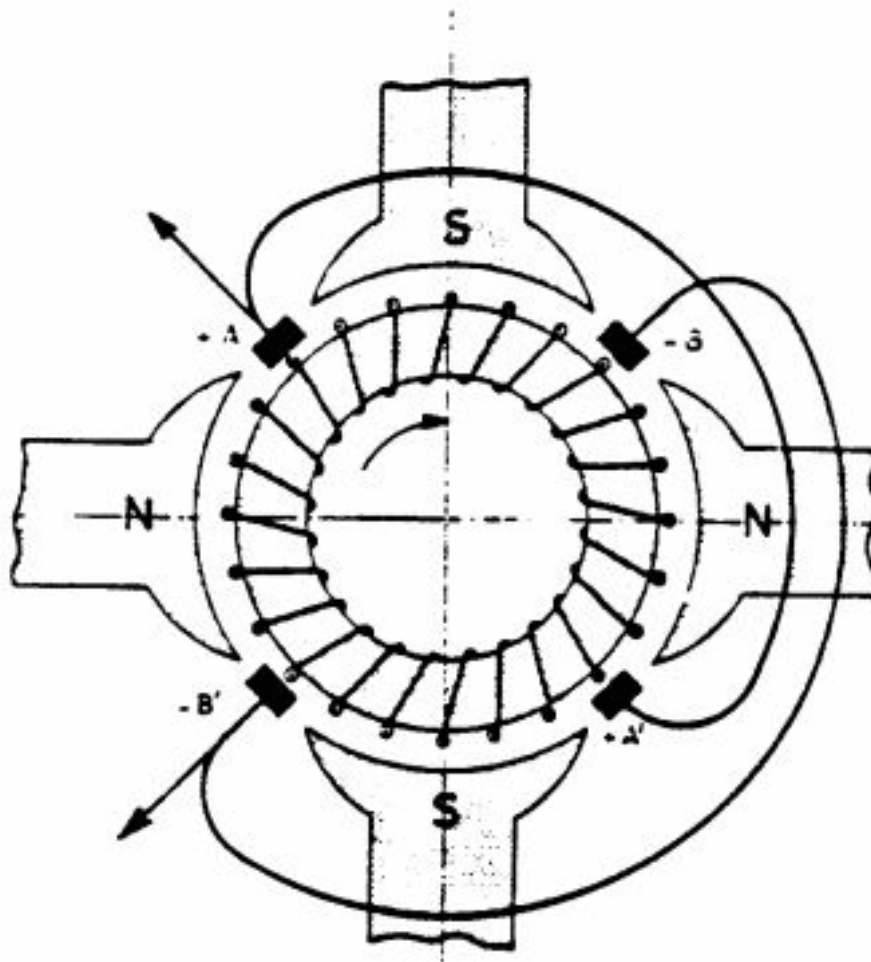
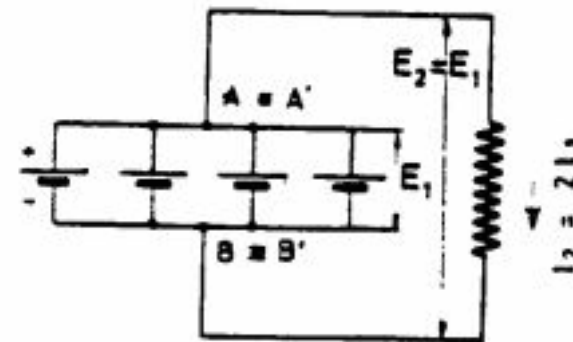
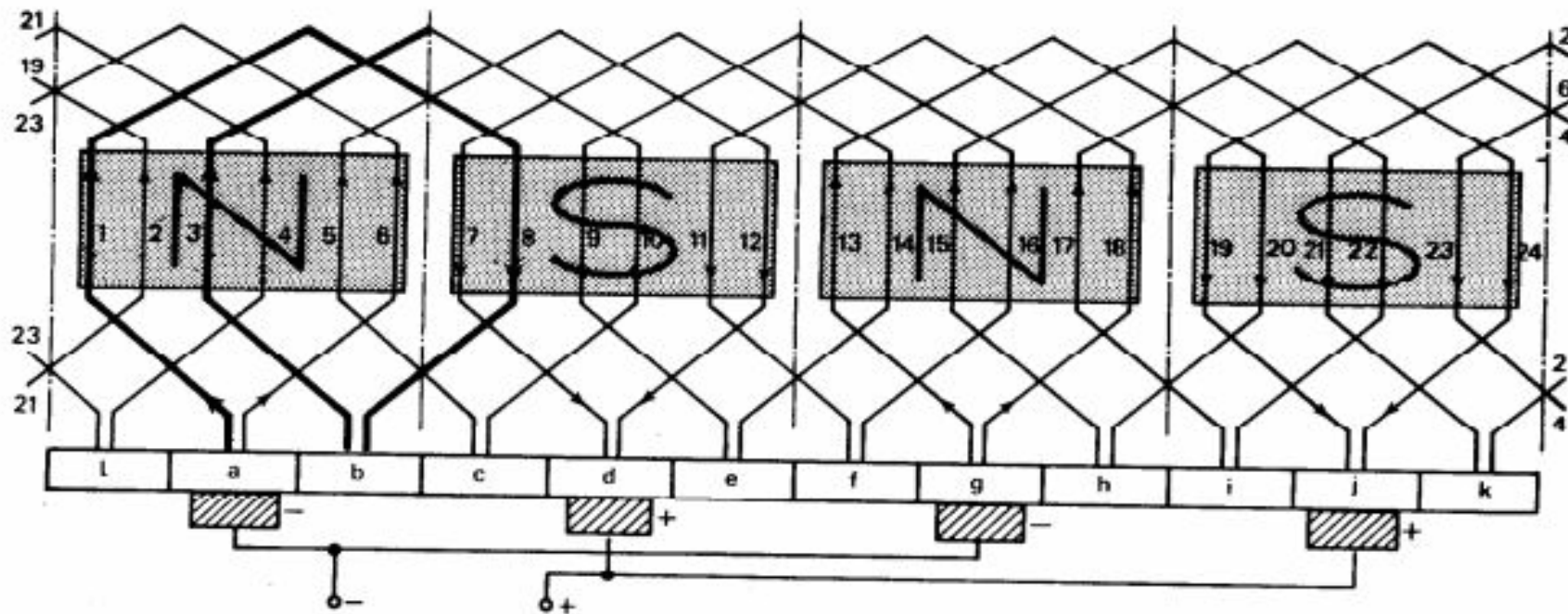


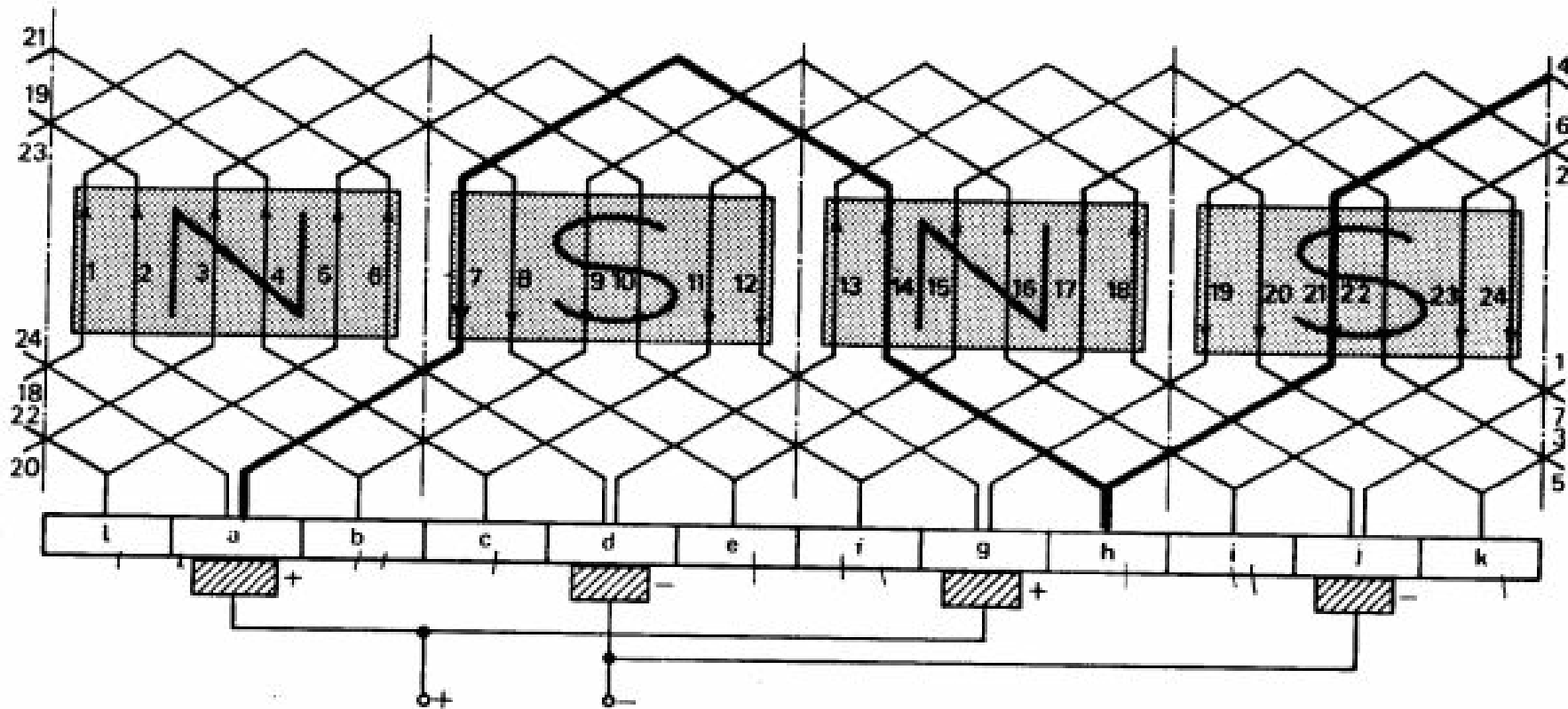
FIGURE 24



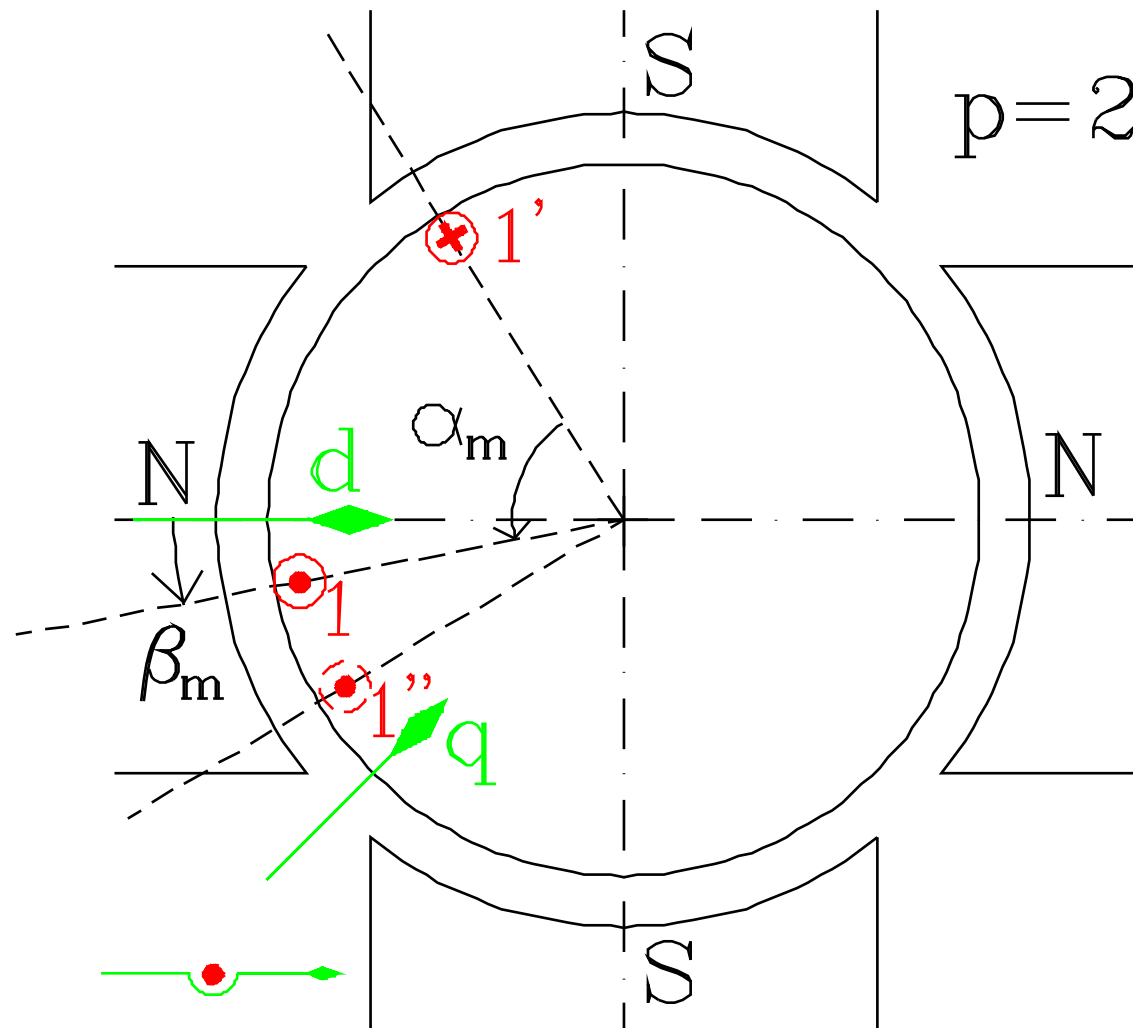
Enroulement imbriqué



Enroulement d'induit ondulé

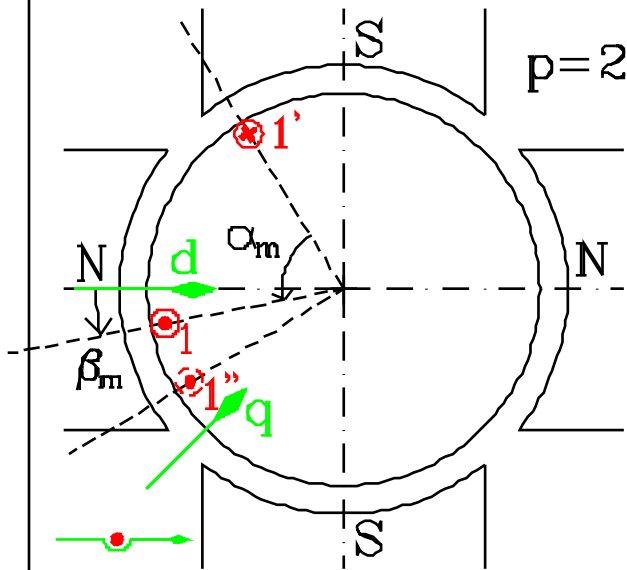


Disposition générale



F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

a. Méthode des champs : f.e.m engendrée dans une spire



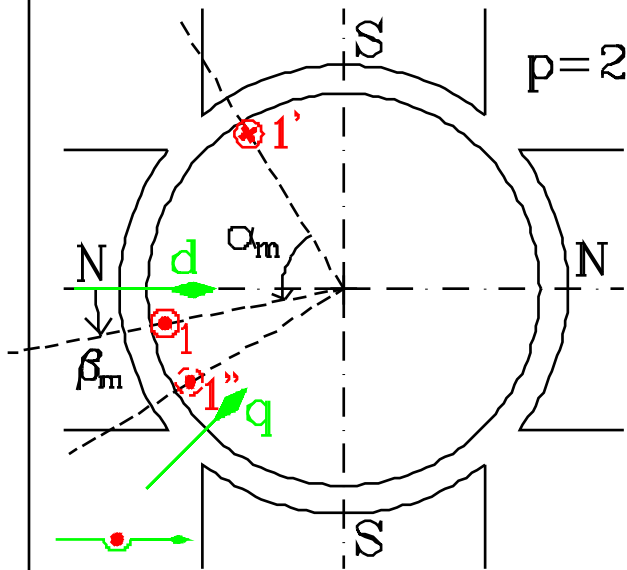
$$\begin{aligned} e_{spire} &= B(\beta_m) l v - B(\beta_m - \alpha_m) l v \\ &= (B(\beta_m) - B(\beta_m - \alpha_m)) l v \end{aligned}$$

Si $\alpha_m = \pi/p$, la spire est dite **diamétrale** et :

$$\begin{aligned} B(\beta_m - \alpha_m) &= -B(\beta_m) \\ \text{donc } e_{spire} &= 2 B(\beta_m) l v \end{aligned}$$

F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

a. Méthode des champs : f.e.m engendrée dans une spire



$$\begin{aligned} e_{spire} &= B(\beta_m) l v - B(\beta_m - \alpha_m) l v \\ &= (B(\beta_m) - B(\beta_m - \alpha_m)) l v \end{aligned}$$

Si $\alpha_m < \pi/p$, la spire est dite "à pas raccourci".

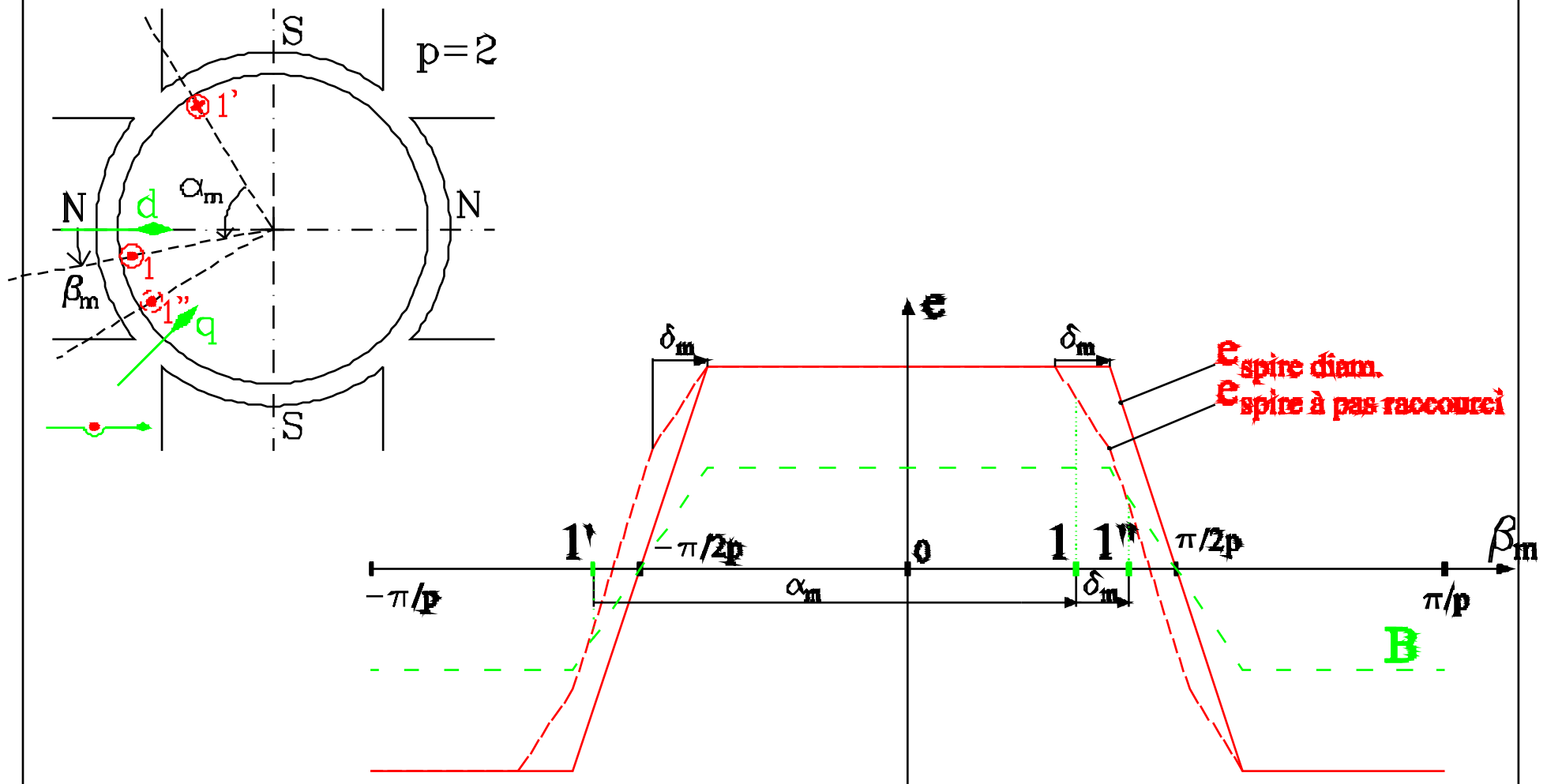
$$\begin{aligned} B(1') &= -B(1'') \quad \text{ou} \quad B(\beta_m - \alpha_m) = -B(\beta_m - \alpha_m + \frac{\pi}{p}) \\ &= -B(\beta_m + \delta_m) \end{aligned}$$

De ce fait :

$$e_{spire} = e_1 - e_{1'} = e_1 + e_{1''}$$

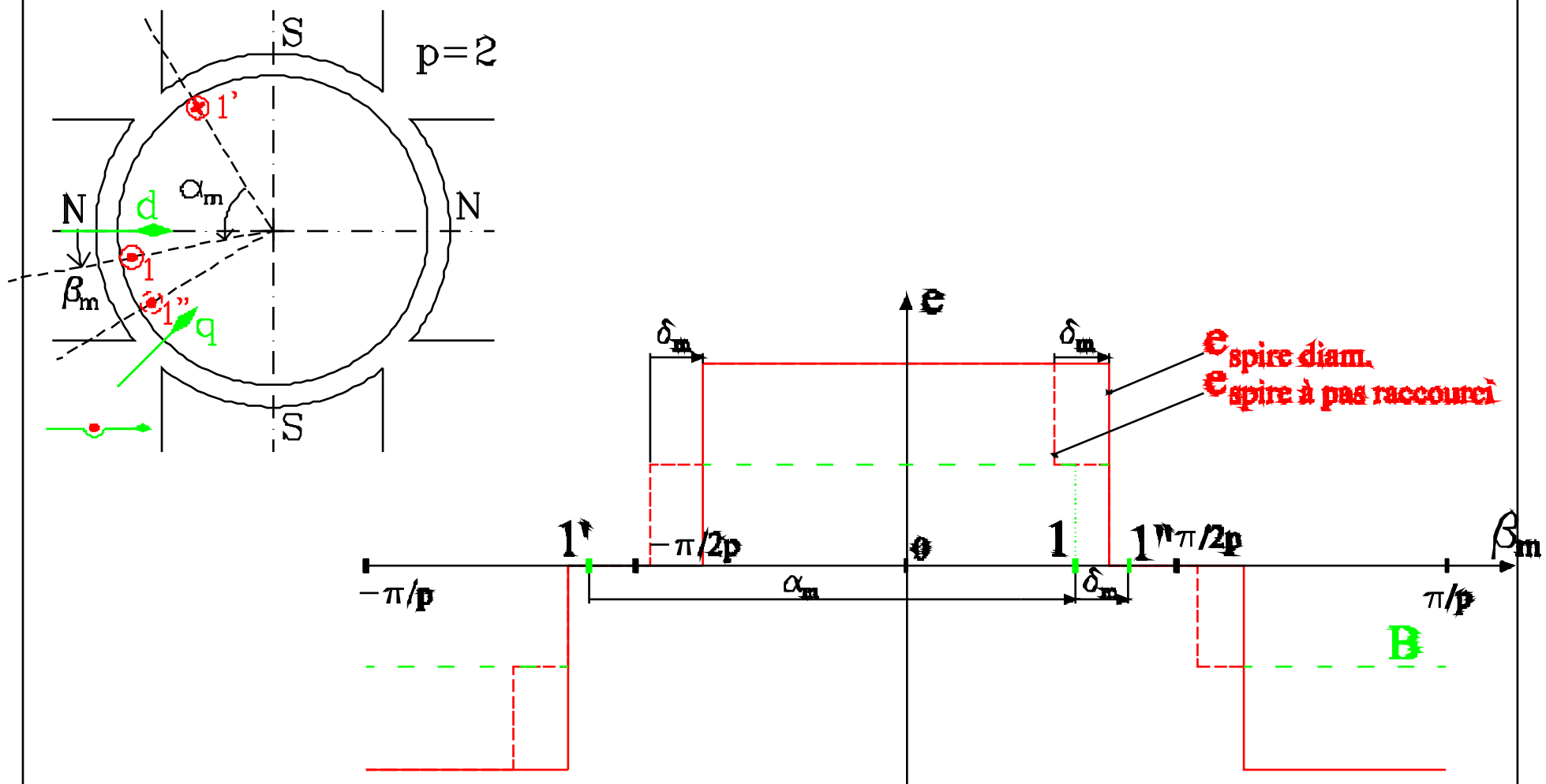
F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

Répartition trapézoïdale de l'induction



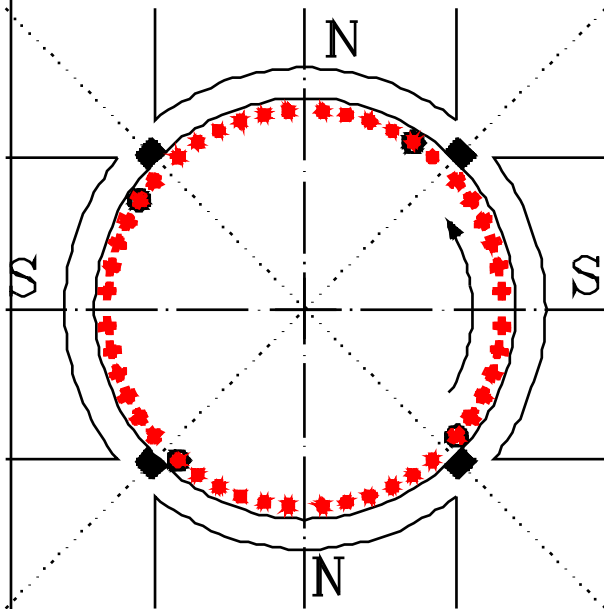
F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

Répartition rectangulaire de l'induction



F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

Force électromotrice entre balais



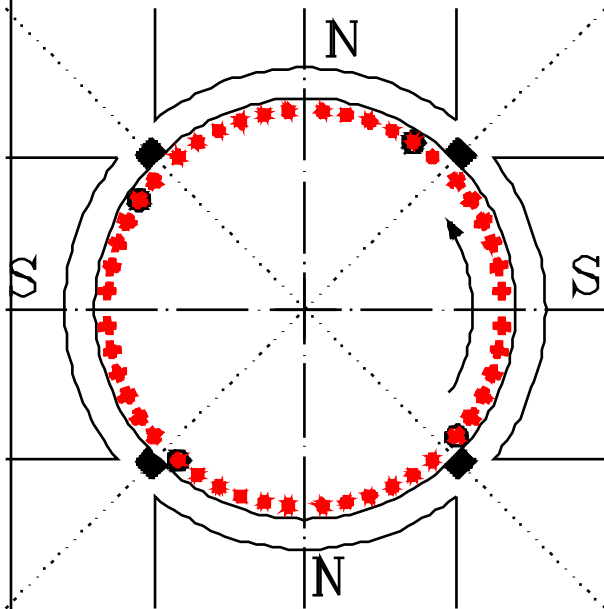
$$e = p \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} e_{\text{spire}} \cdot \text{densité de spires}$$

$$e = p \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} (2B(\beta_m) l v) \frac{N_s}{2d\pi} d\beta_m$$

$$e = \frac{p}{d} N_s \frac{\Omega_r}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B(\beta_m) l R d\beta_m$$

$$e = \frac{p}{d} N_s \frac{\Omega_r}{\pi} \Phi$$

Force électromotrice entre balais



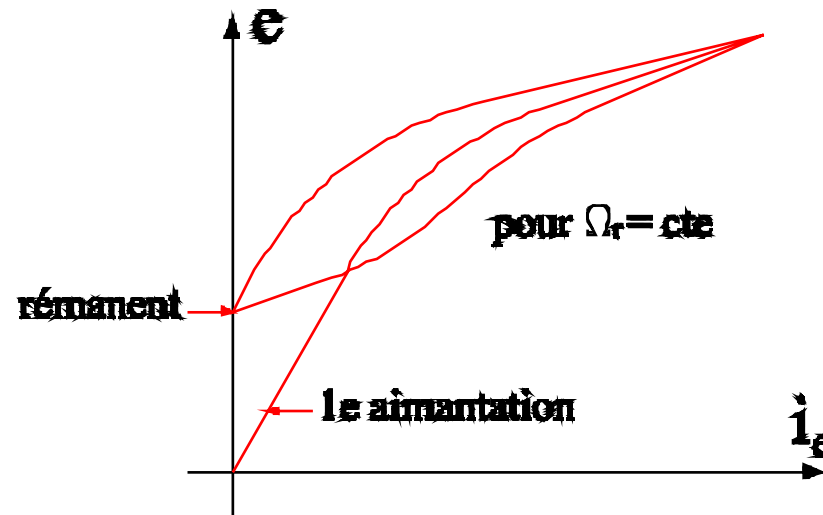
$$e = K \Omega_r \Phi$$

où K est une constante qui dépend des données de l'enroulement.

La f.e.m. (= la tension à vide) d'une dynamo est proportionnelle au flux utile par pôle et à la vitesse de rotation.

F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

Caractéristique à vide

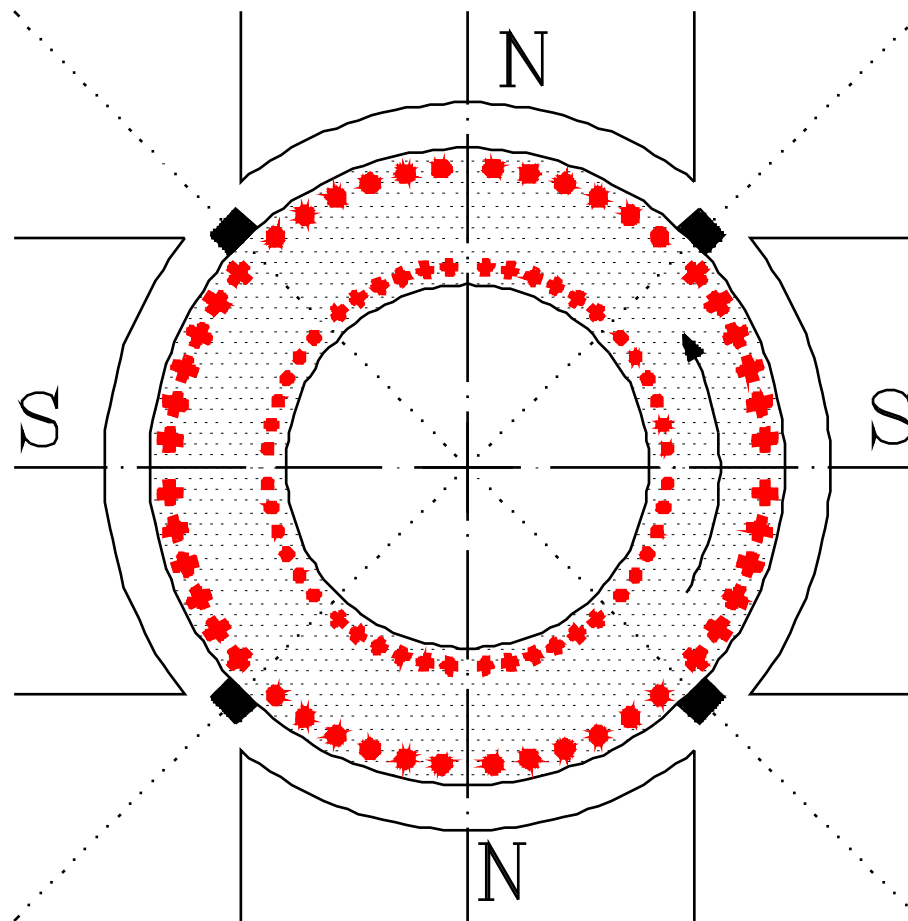


$$e = K \Omega_r \Phi$$

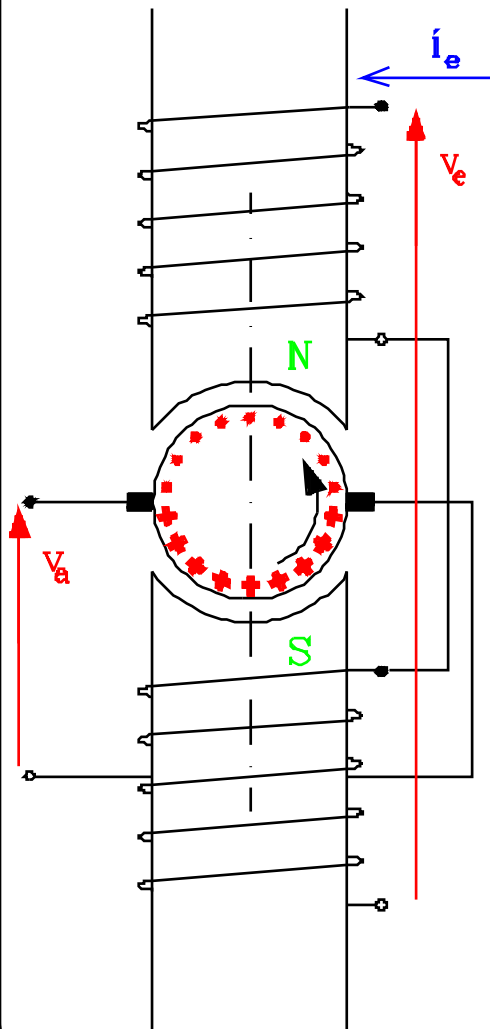
Constater l'existence :

- d'une courbe de première aimantation
- de cycles d'hystérèse
- d'une tension rémanente

Représentation schématique d'une machine à courant continu



b. Méthode des circuits

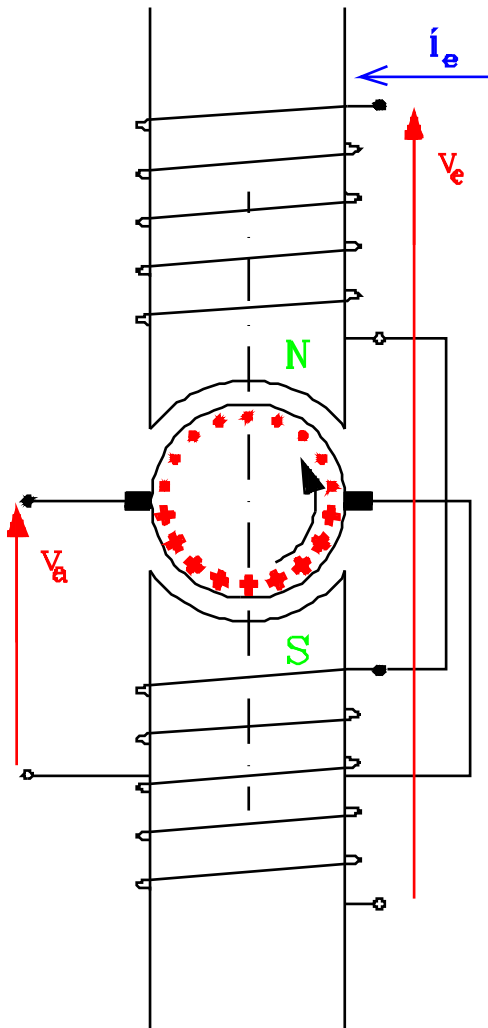


Donc :

$$\begin{aligned}
 (v_a)_{i_a=0} &= D\Psi_a \\
 &= D(M i_e) \\
 &= DM i_e + M Di_e \\
 &= \frac{\partial M}{\partial \beta_m} D\beta_m i_e + \frac{\partial M}{\partial i_e} Di_e i_e + M Di_e \\
 &= G(\beta_m, i_e) \Omega_r i_e + \left(M + \frac{\partial M}{\partial i_e} i_e \right) Di_e
 \end{aligned}$$

F.e.m. engendrée à vitesse de rotation constante

b. Méthode des circuits



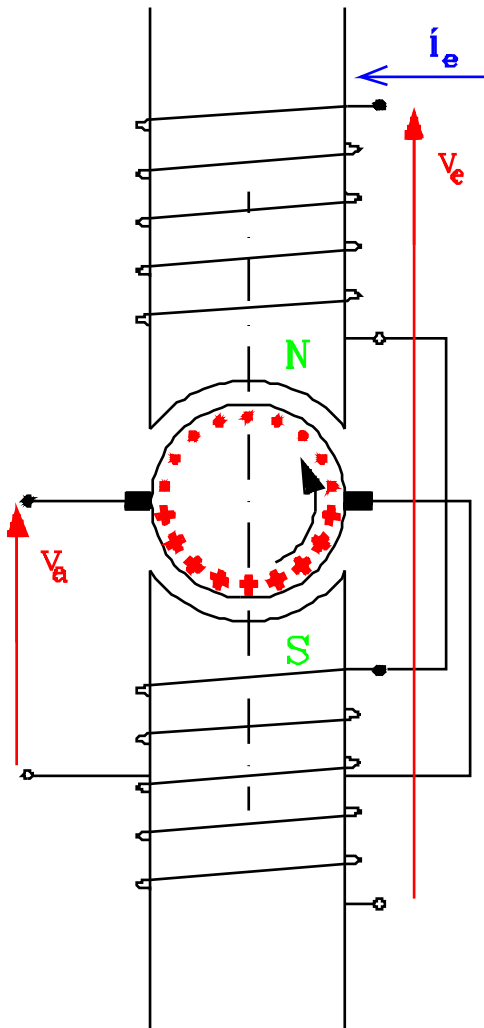
$$\begin{aligned}
 \langle v_a \rangle_{i_a=0} &= D\Psi_a \\
 &= D(M i_e) \\
 &= DM i_e + M Di_e \\
 &= \frac{\partial M}{\partial \beta_m} D\beta_m i_e + \frac{\partial M}{\partial i_e} Di_e i_e + M Di_e \\
 &= G(\beta_m, i_e) \Omega_r i_e + \left(M + \frac{\partial M}{\partial i_e} i_e \right) Di_e
 \end{aligned}$$

On définit :

$$\begin{aligned}
 M' &= M + (\partial M \partial i_e) i_e \\
 &= \text{valeur locale, ou différentielle de la mutuelle} \\
 &= \mathcal{M}_d / \partial i_e \text{ avec } \beta = \text{constante}
 \end{aligned}$$

Cette mutuelle est nulle si les balais sont calés sur l'axe neutre ($\beta = \pi/2$) puisque les enroulements *a* et *e* sont alors perpendiculaires.

b. Méthode des circuits



$$\begin{aligned}
 \psi_a \Big|_{i_a=0} &= D\Psi_a \\
 &= D(M i_e) \\
 &= DM i_e + M Di_e \\
 &= \frac{\partial M}{\partial \beta_m} D\beta_m i_e + \frac{\partial M}{\partial i_e} Di_e i_e + M Di_e \\
 &= G(\beta_m, i_e) \Omega_r i_e + \left(M + \frac{\partial M}{\partial i_e} i_e \right) Di_e
 \end{aligned}$$

On définit également la *fonction d'excitation* :

$$G(i_e) = \partial M(\beta_m, i_e) / \partial \beta_m = (\partial \Psi_a / \partial \beta_m) / i_e \text{ pour } \beta = \pi/2 \text{ et } i_e = \text{constante}$$

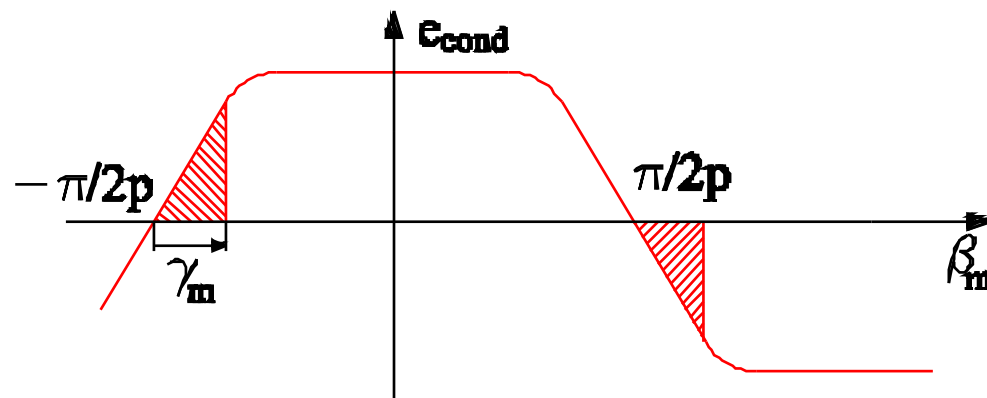
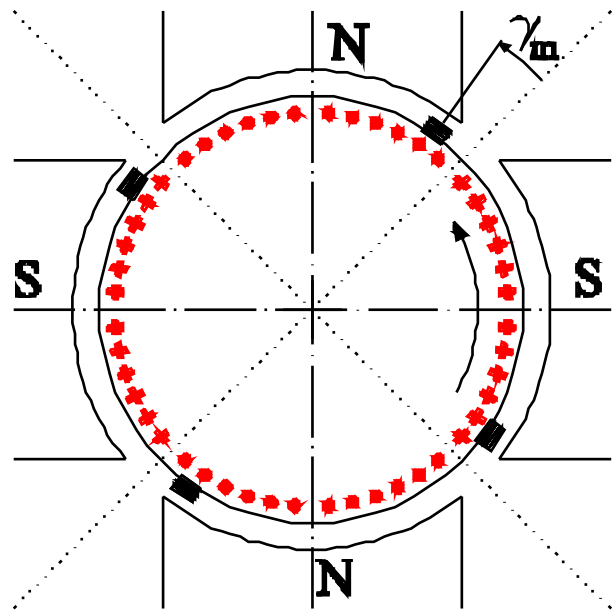
La f.e.m. engendrée vaut donc :

$$e = \psi_a \Big|_{i_a=0} = G(i_e) i_e \Omega_r$$

Cette relation est tout à fait semblable à la relation (4.1-11) qui permet d'écrire :

$$G(i_e) i_e = K \Phi$$

Décalage des balais



Modèle

4.1.3. Tension à vide - modèle mathématique



Modèle

4.1.3. Tension à vide - modèle mathématique

Modèle : représentation approchée du réel effectuée dans un but déterminé : comprendre ou prévoir

Modèle mathématique : modèle de représentation du comportement dynamique d'un système

Modèle mathématique : remarques

4.1.3. Tension à vide - modèle mathématique

1. Le modèle doit être adapté au but poursuivi
2. Le modèle doit être simple
3. Le modèle doit être homogène

Exemple de modèle mathématique : la dynamo à vide

Considérons comme :

- variables de commande :

v_e : la tension aux bornes du circuit d'excitation

Ω_r : la vitesse de rotation (imposée par un moteur d'entraînement)

- variable de sortie :

e : la tension à vide aux bornes des balais avec $e = G i_e \Omega_r$

Il suffit de la compléter par l'équation du circuit d'excitation pour obtenir le modèle cherché :

$$v_e = R_e i_e + D \Psi_e$$

avec des notations évidentes.

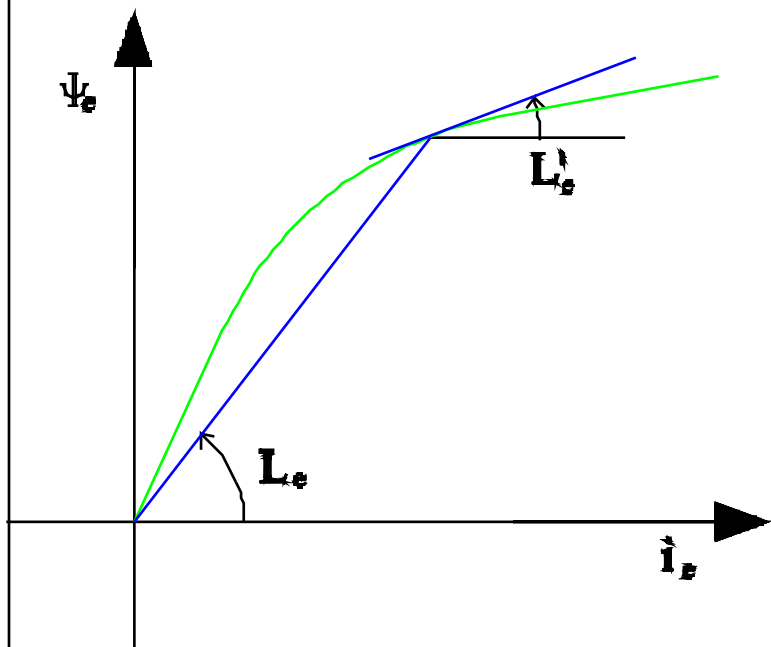
Il n'y a qu'une variable d'état soit i_e , soit Ψ_e .

Tension à vide - modèle mathématique

La dynamo à vide : modèle non-linéaire

Il existe une relation non-linéaire entre Ψ_e et i_e qui peut se mettre sous la forme :

$$\Psi_e = L_e(i_e) i_e$$



où L_e = inductance propre du circuit d'excitation
= fonction de i_e si l'on tient compte des non-linéarités magnétiques
= indépendante de la position du rotor si on néglige l'effet des encoches

Tension à vide - modèle mathématique

La dynamo à vide : modèle non-linéaire

Ψ_e = variable d'état

$$D\Psi_e = v_e - R_e i_e(\Psi_e)$$

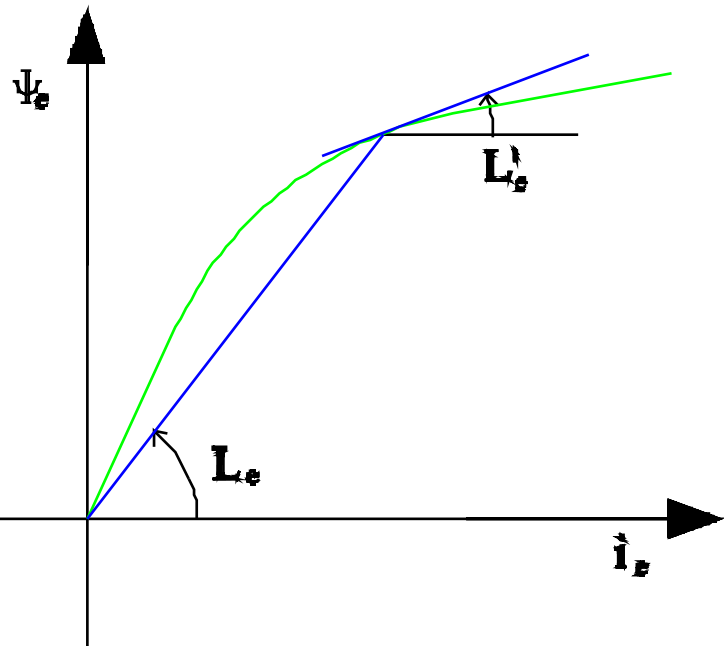
i_e = variable d'état

$$\frac{\partial \Psi_e}{\partial i_e} Di_e = v_e - R_e i_e$$

$$\text{donc } Di_e = \frac{v_e - R_e i_e}{L'_e}$$

avec $L'_e(i_e)$ = valeur locale ou différentielle de l'inductance propre du circuit e

$$\begin{aligned} &= L_e + (\partial L_e / \partial i_e) i_e \\ &= \partial \Psi_e / \partial i_e \end{aligned}$$

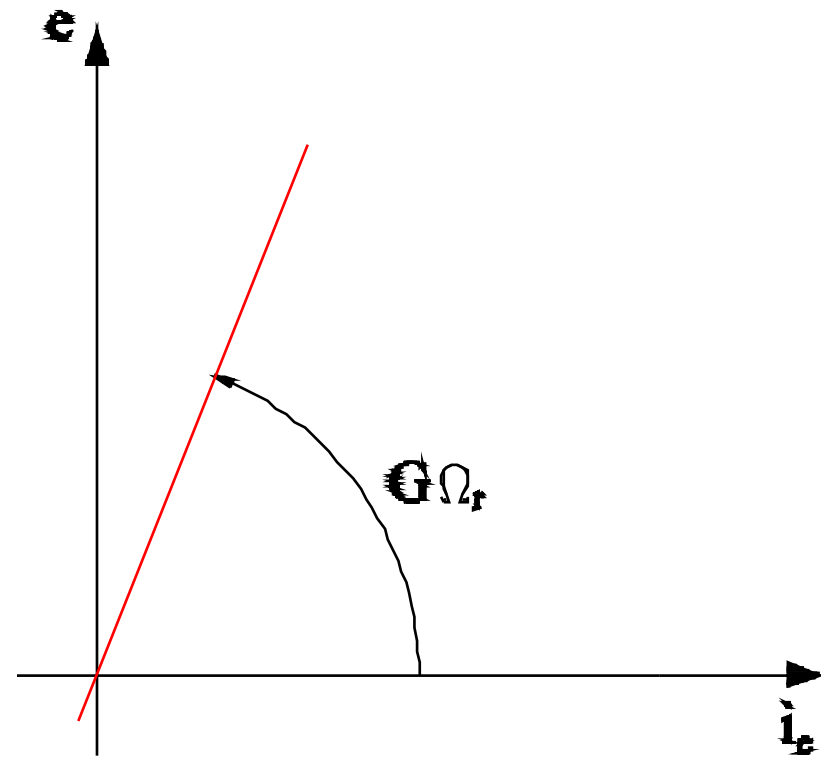
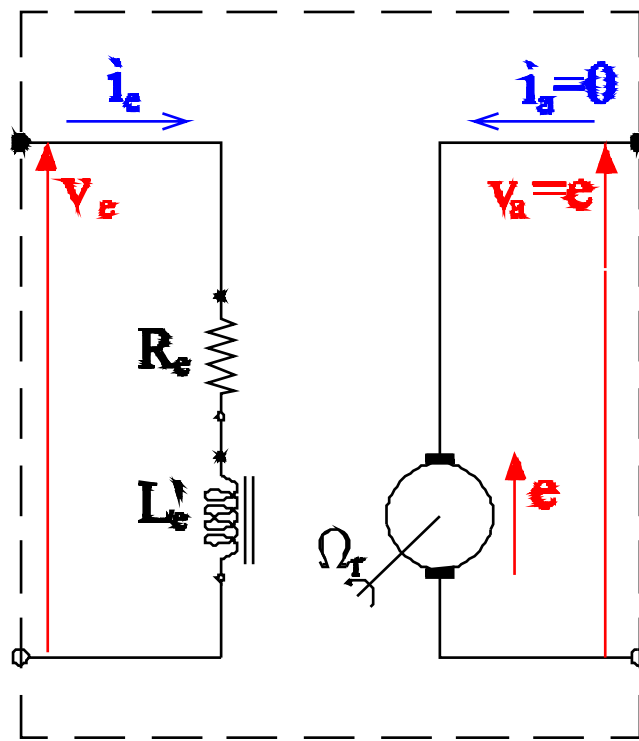


Tension à vide - modèle mathématique

La dynamo à vide : schéma équivalent

$$v_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}$$

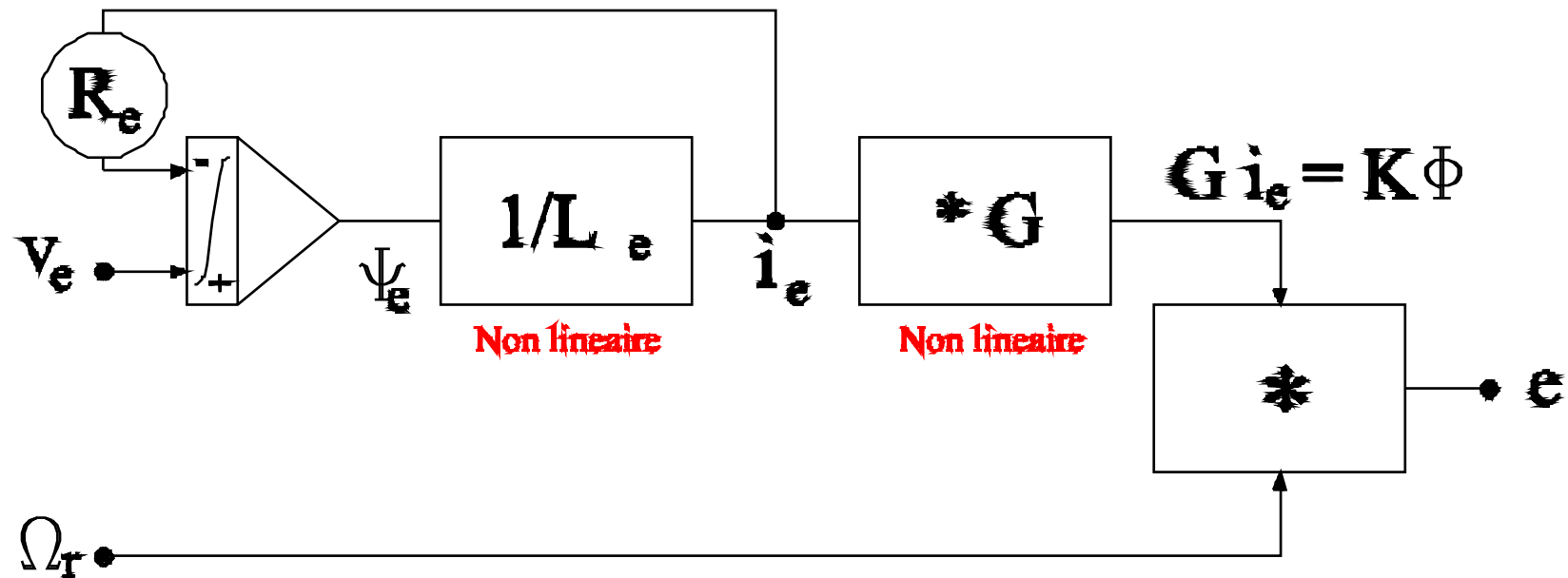
$$e = K \Phi \Omega_r = G \Omega_r i_e$$



Tension à vide - modèle mathématique

La dynamo à vide : schéma-bloc

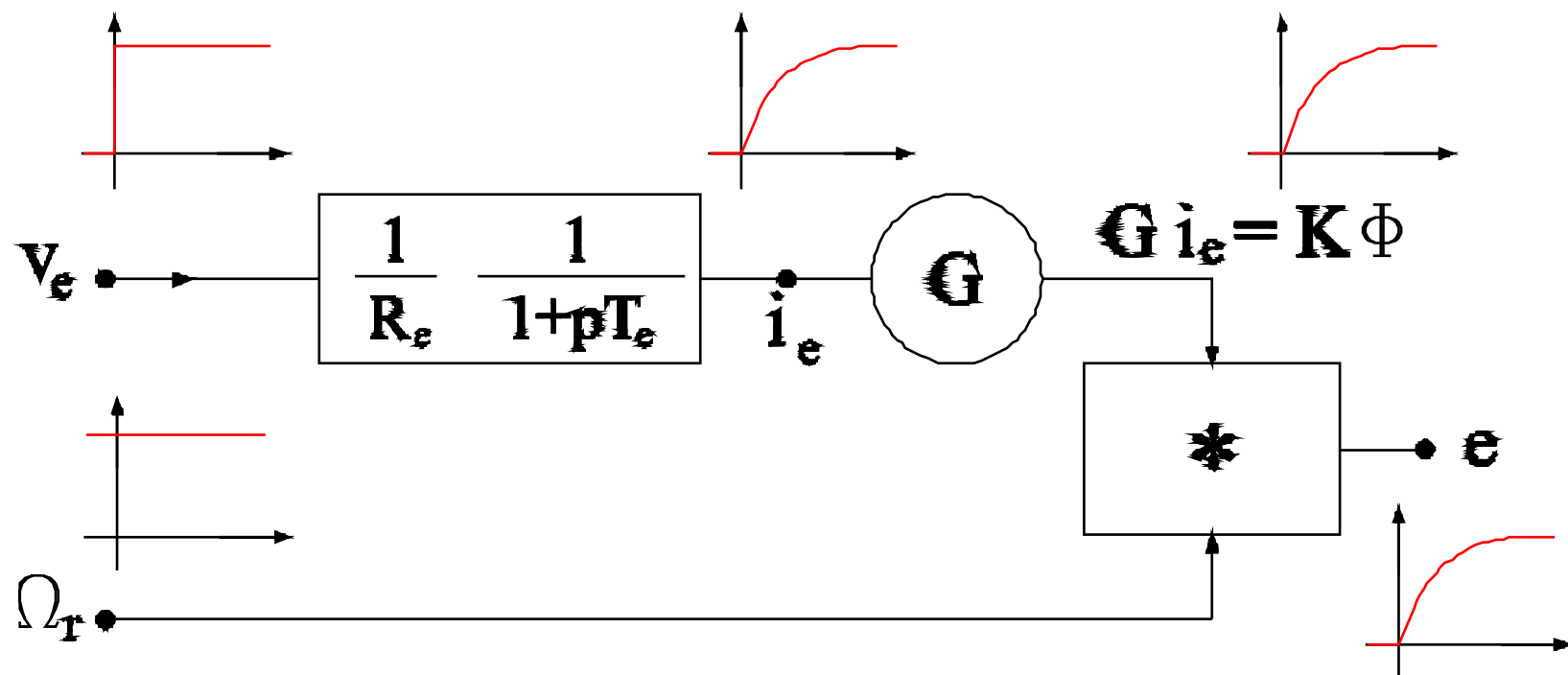
$$D \Psi_e = v_e - R_e i_e(\Psi_e) \quad (4.1 - 26)$$



Tension à vide - modèle mathématique

La dynamo à vide : modèle linéaire

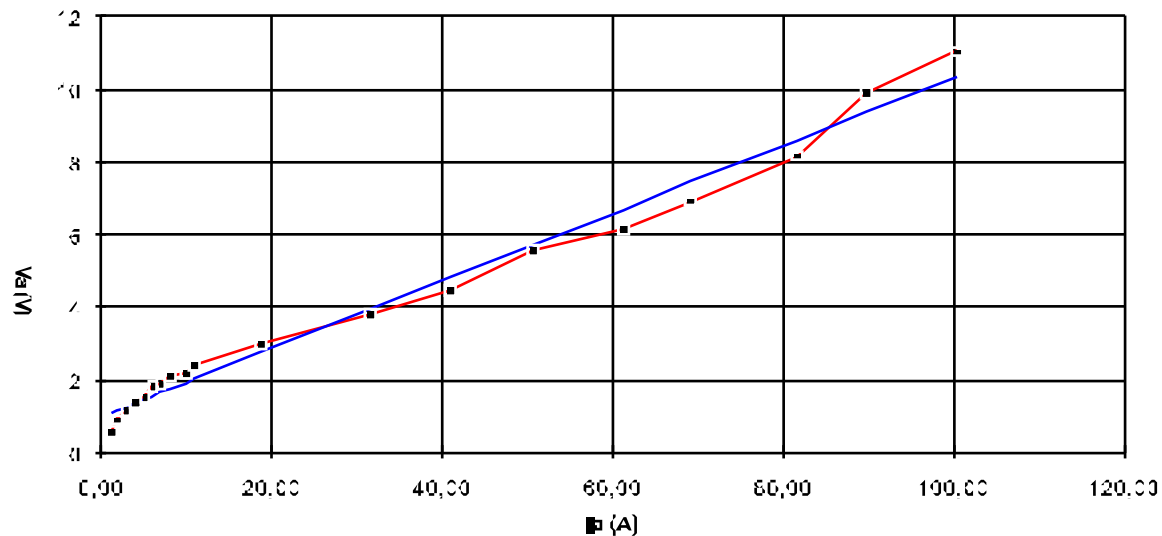
$$\begin{aligned} v_e &= R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} \\ e &= G \Omega_r i_e \end{aligned}$$



Tension à vide - modèle mathématique

Effet Joule

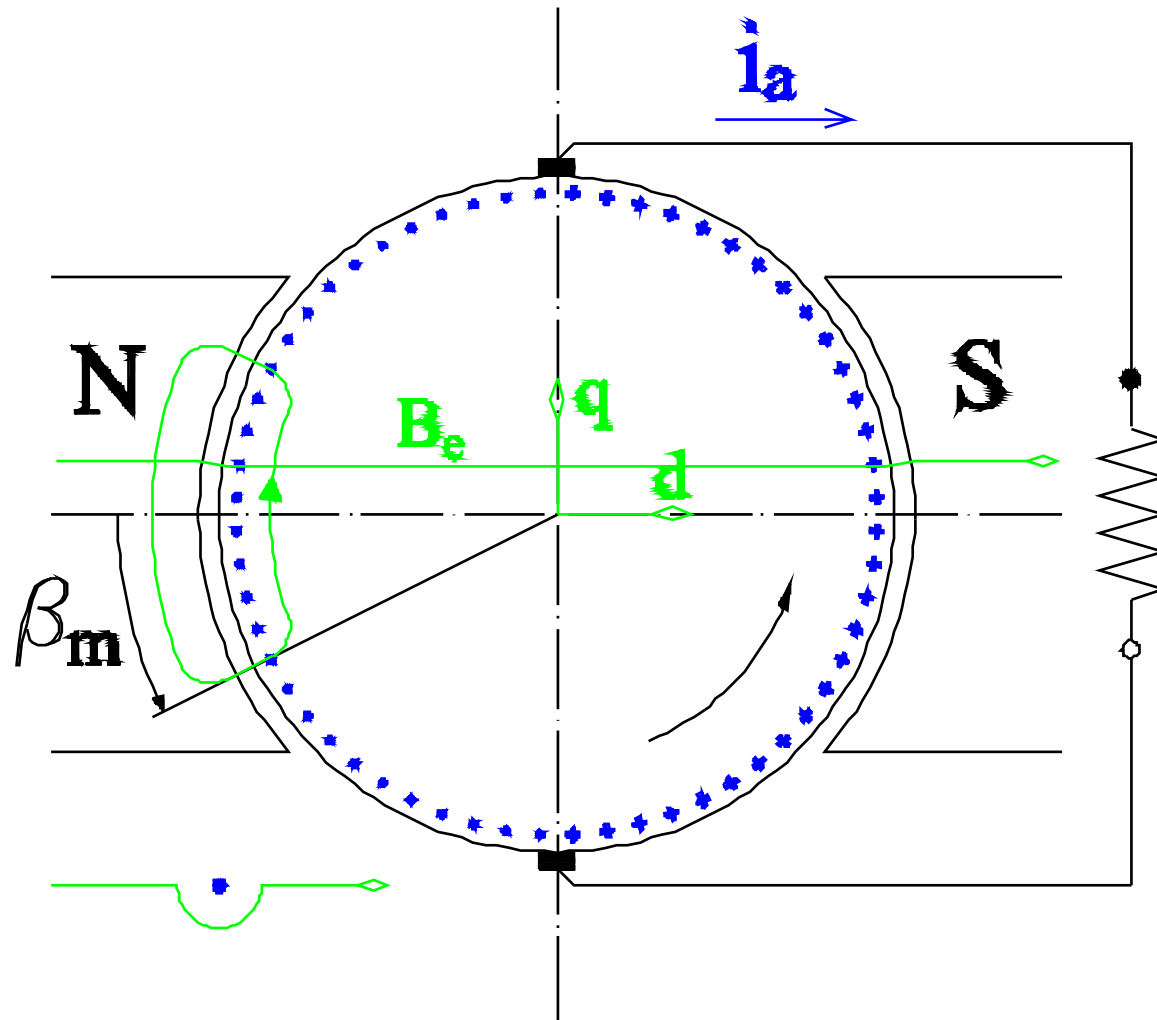
Machine à courant continu



$$\Delta V_{Ra} = \Delta V_b \text{ sign}(i_a) + R_a i_a$$

où : ΔV_b représente la chute de tension du contact balais-collecteur et R_a la résistance des enroulements et connexions.

Réaction d'induit transversale



Réaction d'induit transversale

Les A.t. enserrés par une ligne d'induction valent :

$$\frac{N_c}{2\pi} \frac{i_a}{2d} 2\beta_m$$

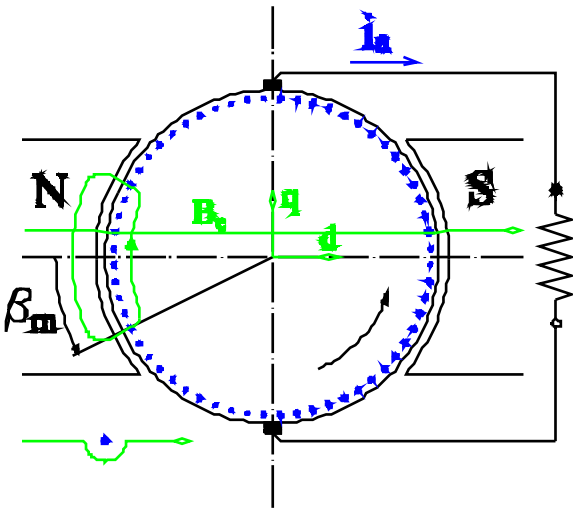
Par raison de symétrie par rapport à l'axe des pôles, on peut attribuer la moitié des A.t. à chacune des moitiés du chemin et, par extension (et abus de langage), attribuer des A.T. au point où le chemin traverse l'entrefer.

Si l'entrefer était constant et si le fer était parfait :

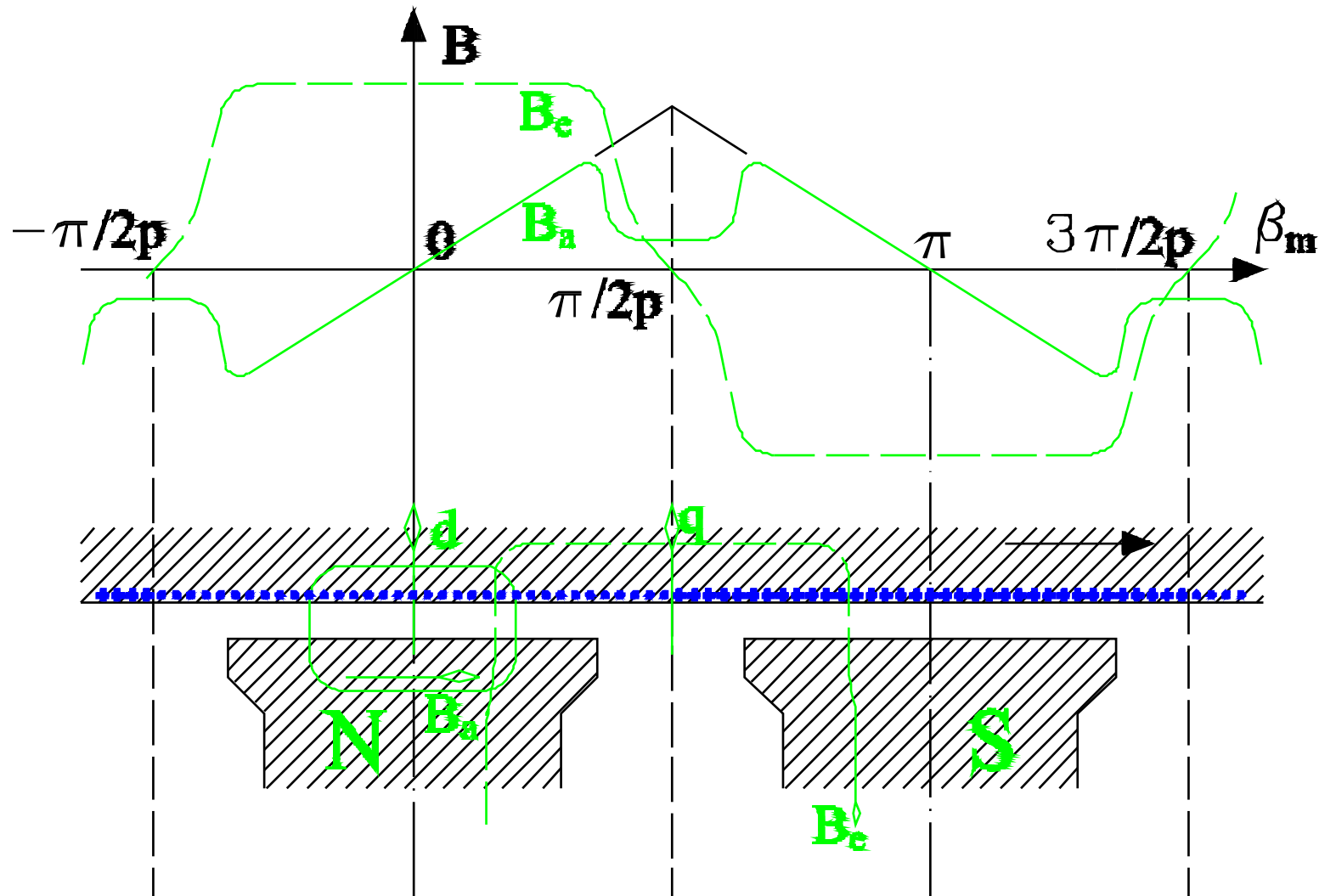
$$H(\beta_m) = \frac{N_c}{2\pi} \frac{i_a}{2d} \frac{\beta_m}{\delta}$$

Le champ magnétique atteindrait sa valeur maximale pour $\beta_m = \pi/2p$

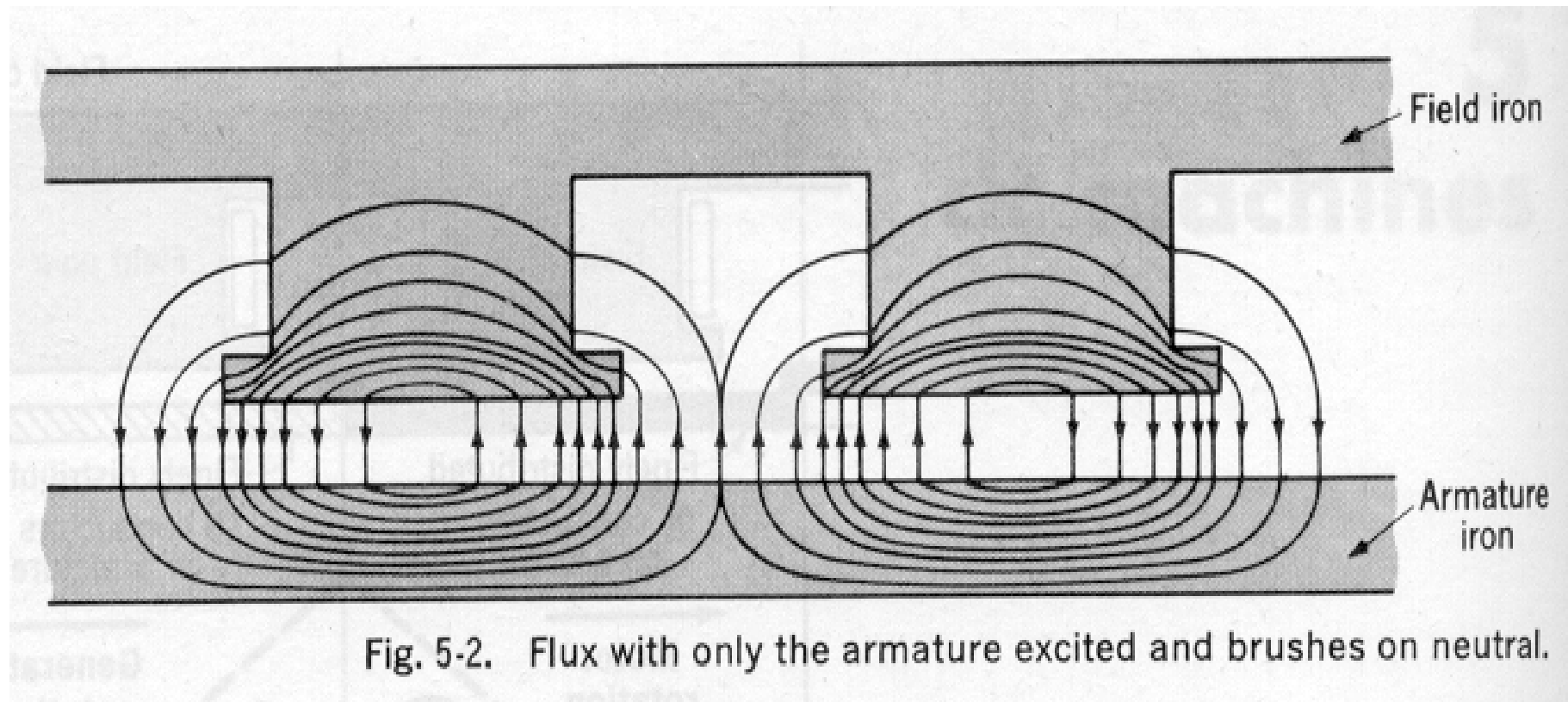
$$H\left(\frac{\pi}{2p}\right) = \frac{N_c}{2\pi} \frac{i_a}{2d} \frac{\pi}{2p\delta} = \frac{N_c}{8\delta} \frac{i_a}{pd} = \frac{N_s}{4\delta} \frac{i_a}{pd}$$



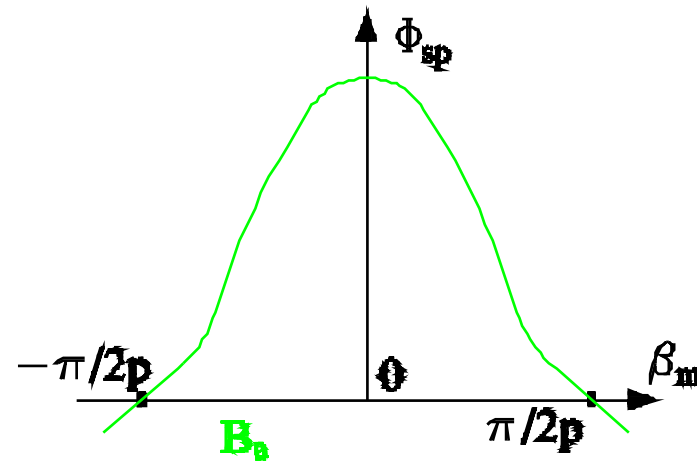
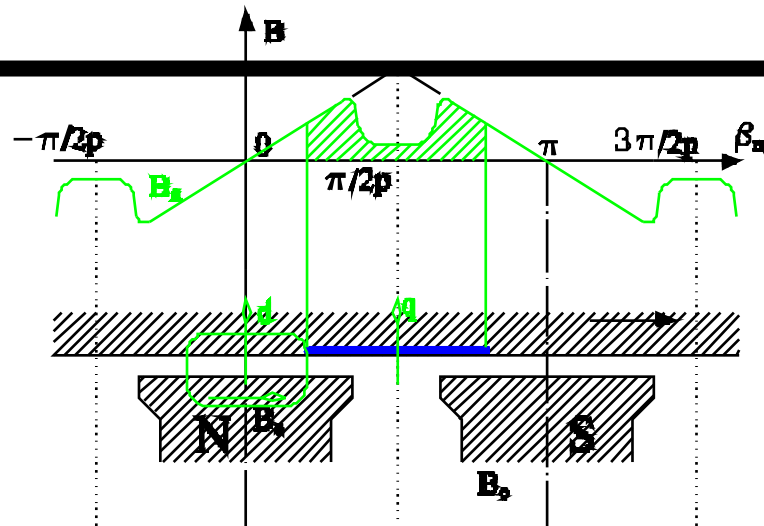
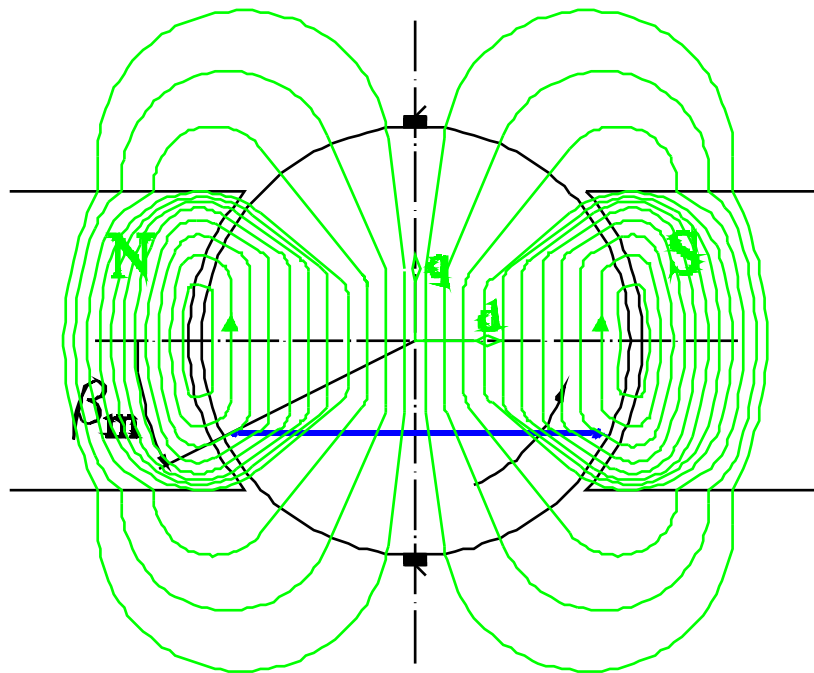
Réaction d'induit transversale



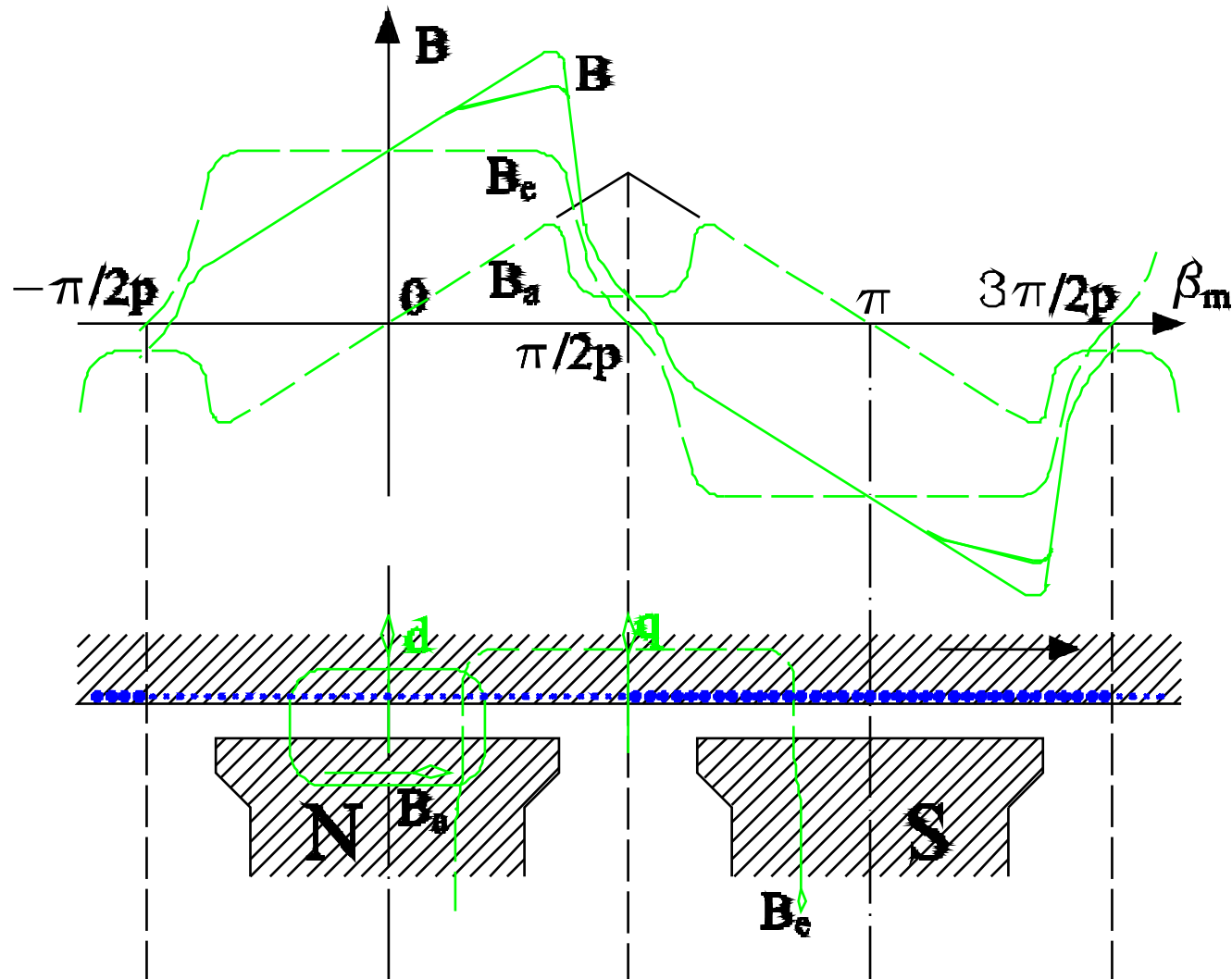
Réaction d'induit transversale



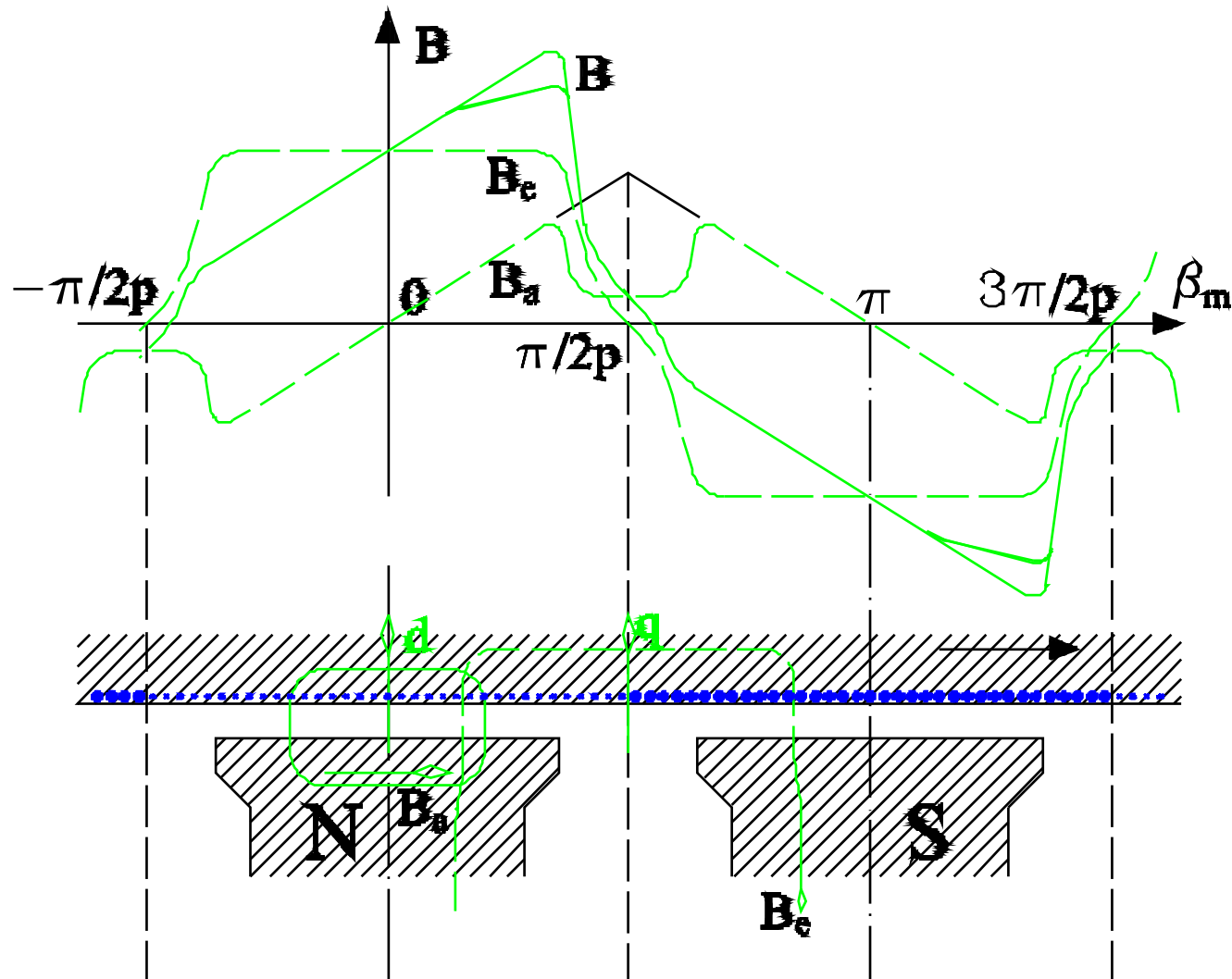
Calcul de l'inductance d'armature



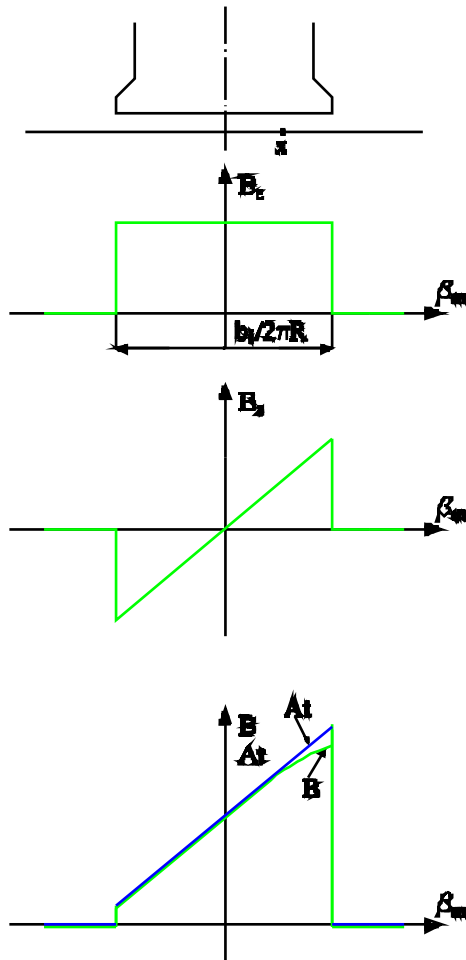
Champ résultant sans saturation



Champ résultant avec saturation



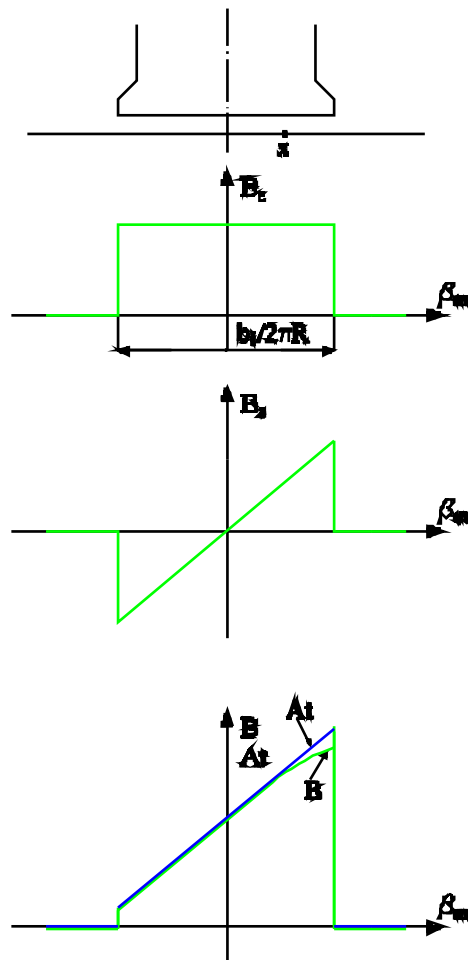
Calcul de l'effet démagnétisant de la réaction d'induit



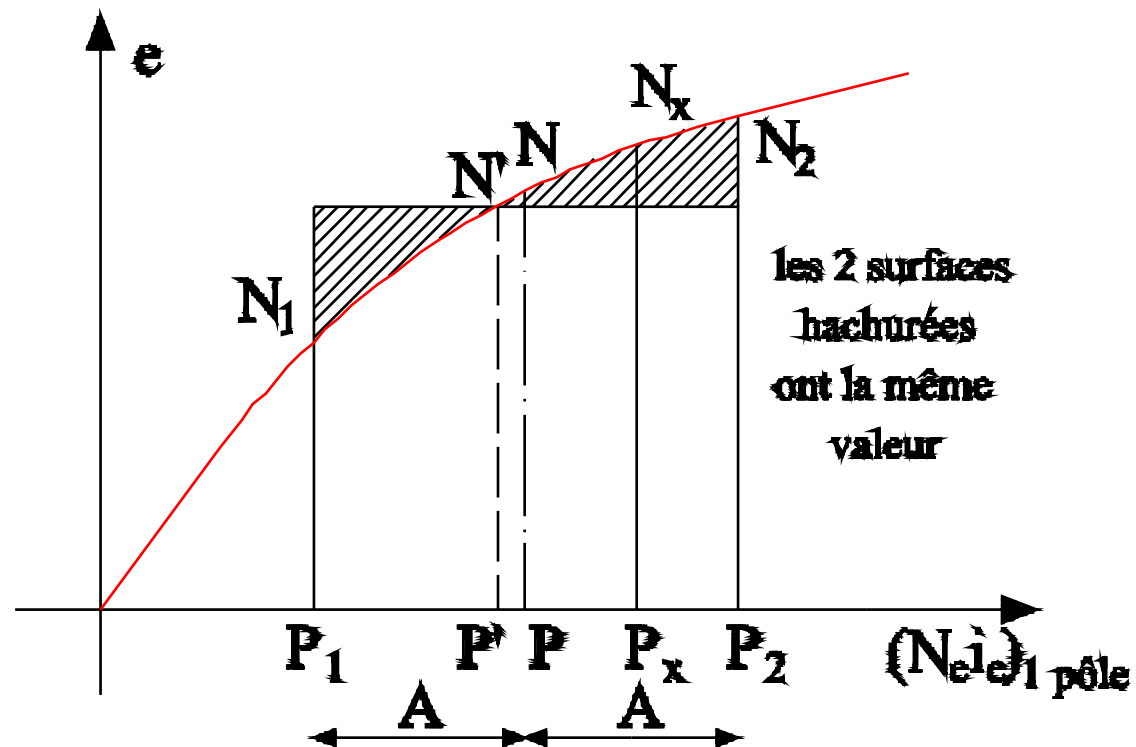
Hypothèses :

- les lignes de force sont supposées radiales dans l'entrefer
- l'induction est supposée nulle en dehors de la largeur idéale d'un pôle.
- la démonstration est faite pour $p = d = 1$

Calcul de l'effet démagnétisant de la réaction d'induit



$$A = \frac{N_c}{2\pi} \frac{i_a}{2} \frac{b_i}{4\pi R}$$



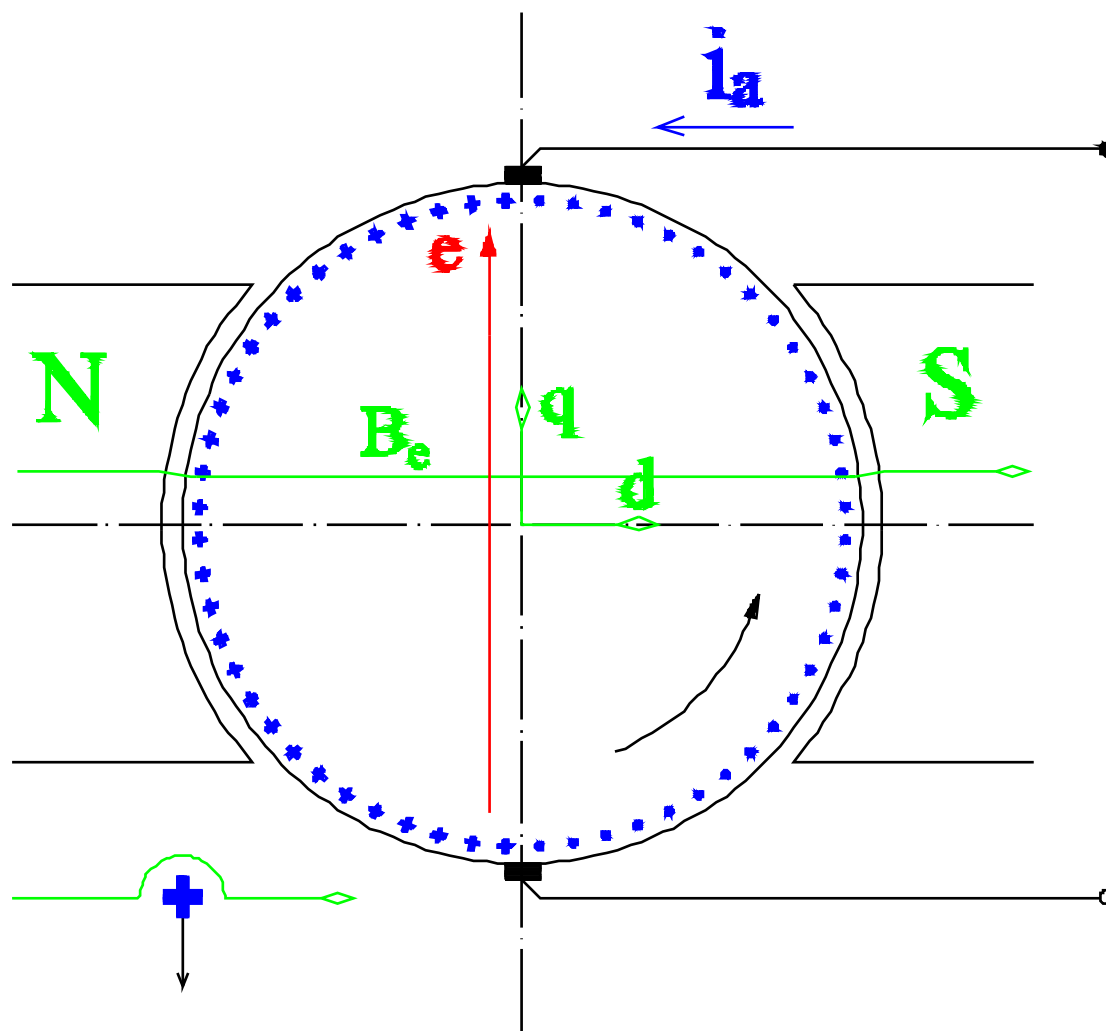
Couple électromécanique

$$\left[P_{\text{électrique}} - (P_{p\text{Joule}} + P_{p\text{magn}}) \right] + [P_{\text{mécan}} - P_{p\text{méca}}] = 0$$

• $P_{\text{électromagnétique}}$

$$\begin{aligned} P_{em} &= C_{em} \Omega_r \\ \text{et } P_{em} &= P_{\text{électrique}} - P_{pJ} \\ &= v_a i_a - R_a i_a^2 \\ &= e i_a \quad \text{avec } e = K \Phi \Omega_r \\ \text{donc } C_{em} &= K \Phi i_a = G i_e i_a \end{aligned}$$

Fonctionnement en moteur

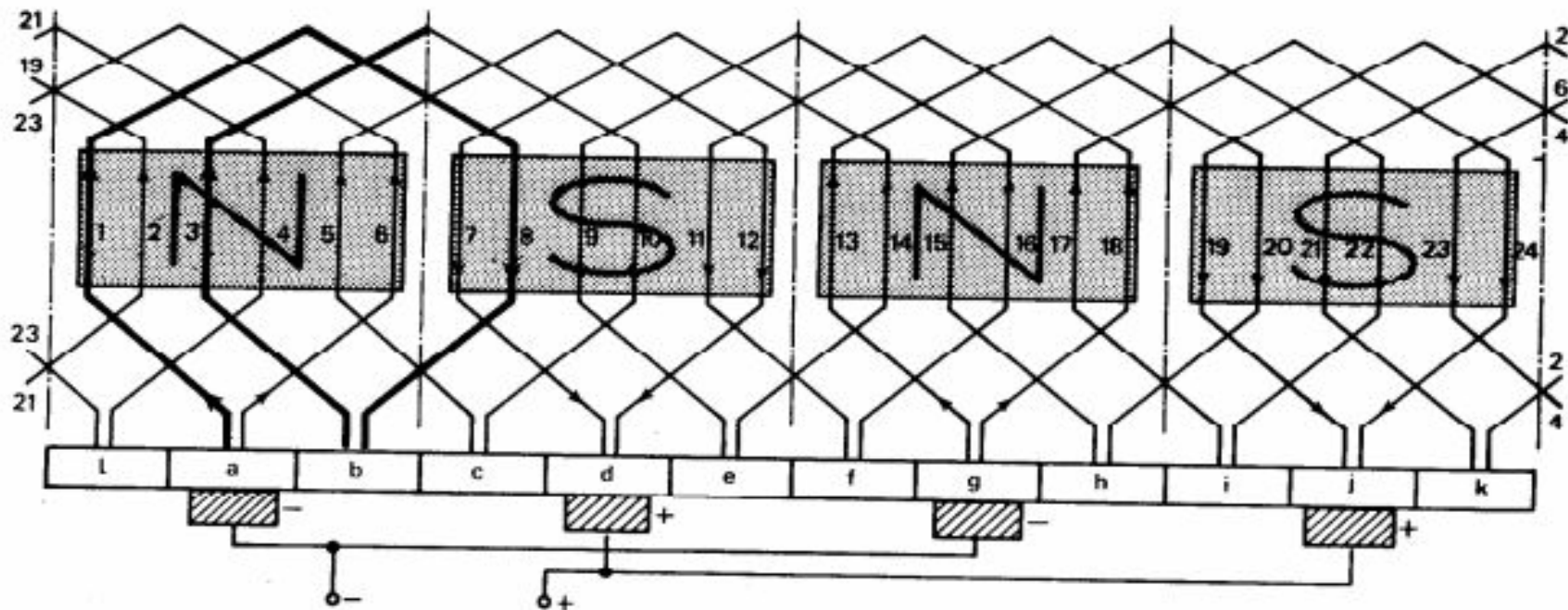


Inconvénients de la réaction d'induit

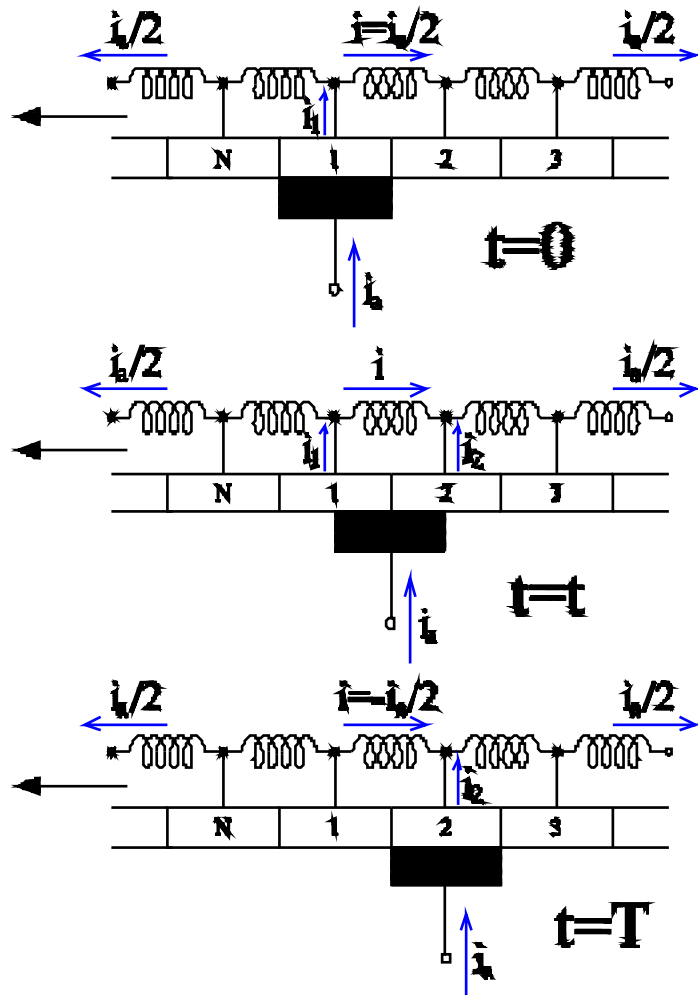
La réaction d'induit :

- déplace la ligne neutre ($B = 0$) et rend ainsi la commutation difficile comme on le verra.
- augmente l'induction et fait courir le risque d'un claquage entre les lames du collecteur.
- est la cause de l'inductance du rotor qui s'oppose aux variations rapides du courant d'induit (et donc du couple).

La commutation

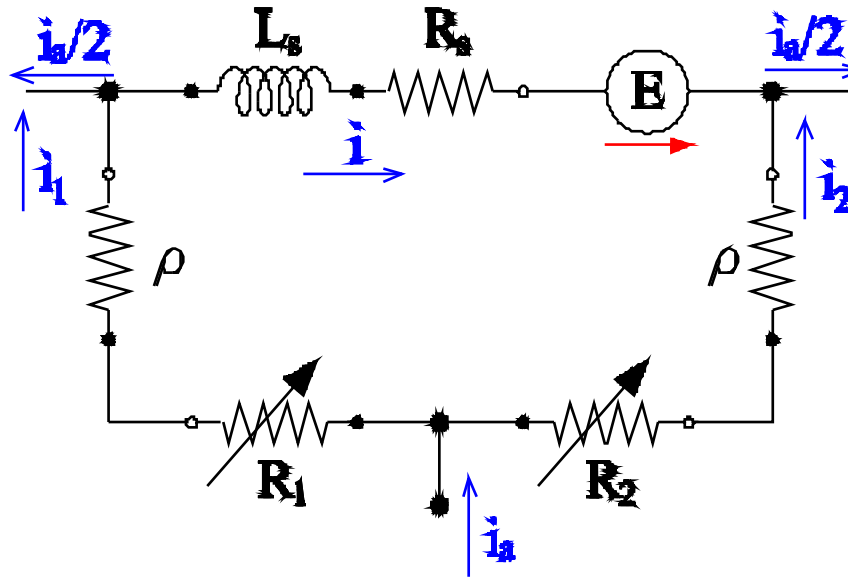
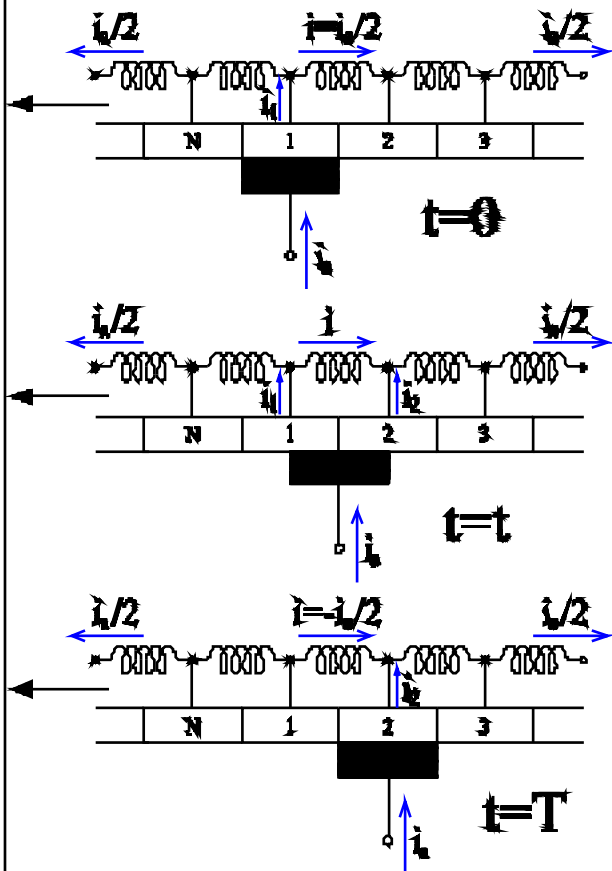


La commutation : hypothèses



- parfait état mécanique des balais et du collecteur
- constance de la résistivité du contact balai-collecteur qui ne dépend ni de la densité du courant, ni de la surface de contact
- égalité de la largeur d'un balai et d'une lame

Equation électrique de la bobine



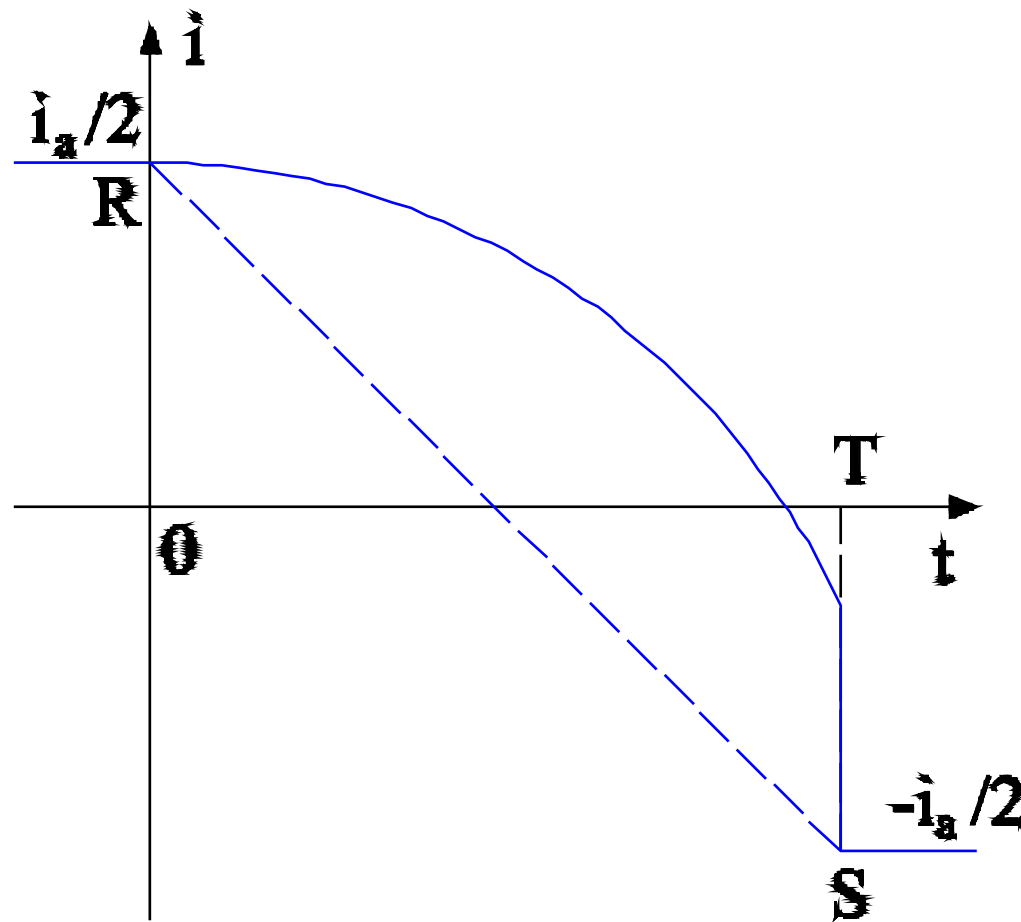
$$E = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + \rho i_1 + R_1 i_1 - R_2 i_2 - \rho i_2$$

$$\text{avec : } i_1 = \frac{i_a}{2} + i$$

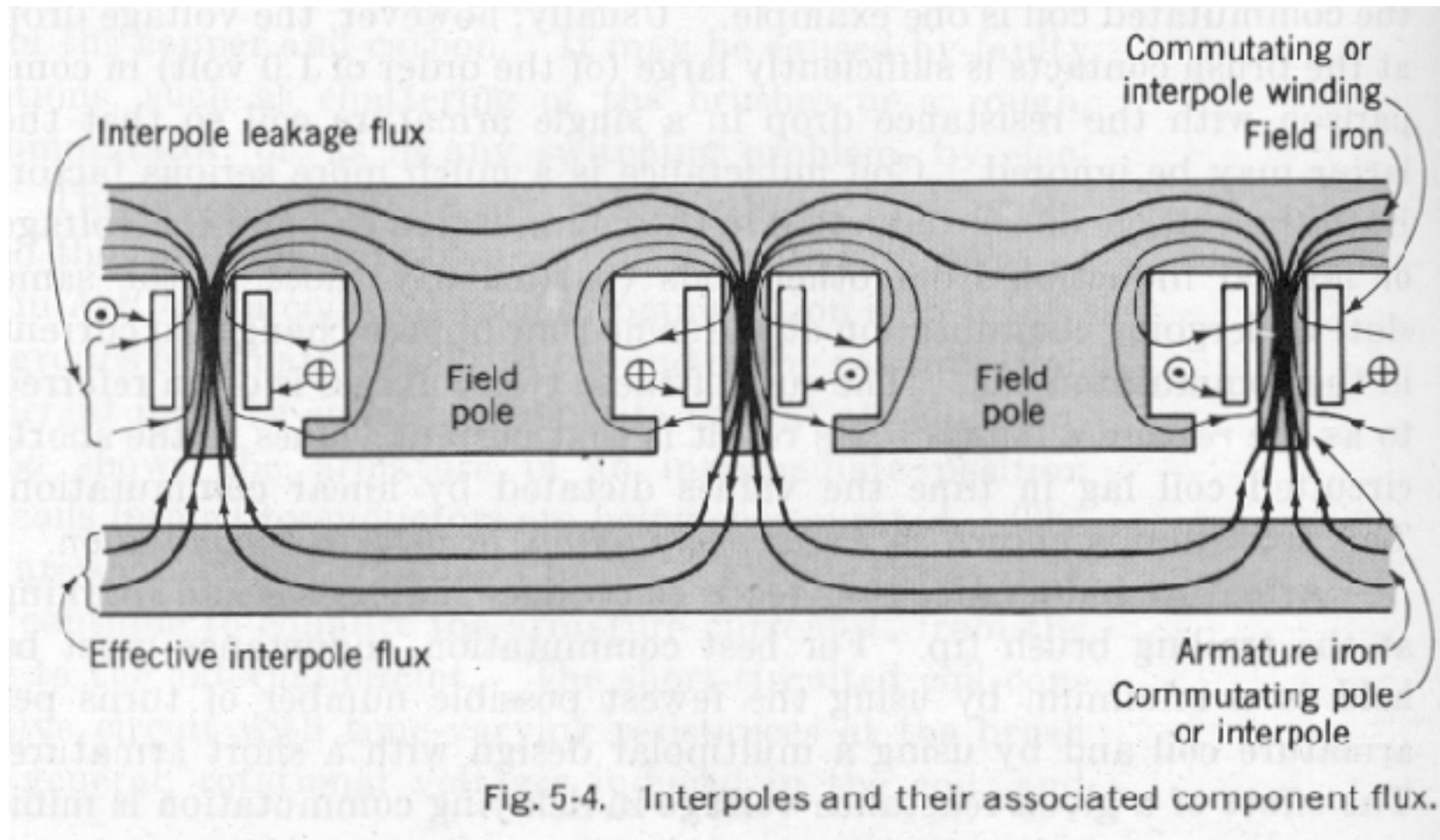
$$i_2 = \frac{i_a}{2} - i$$

$$\text{donc : } L_s \frac{di}{dt} + (R_s + 2\rho + (R_1 + R_2)) i = E + (R_2 - R_1) \frac{i_a}{2}$$

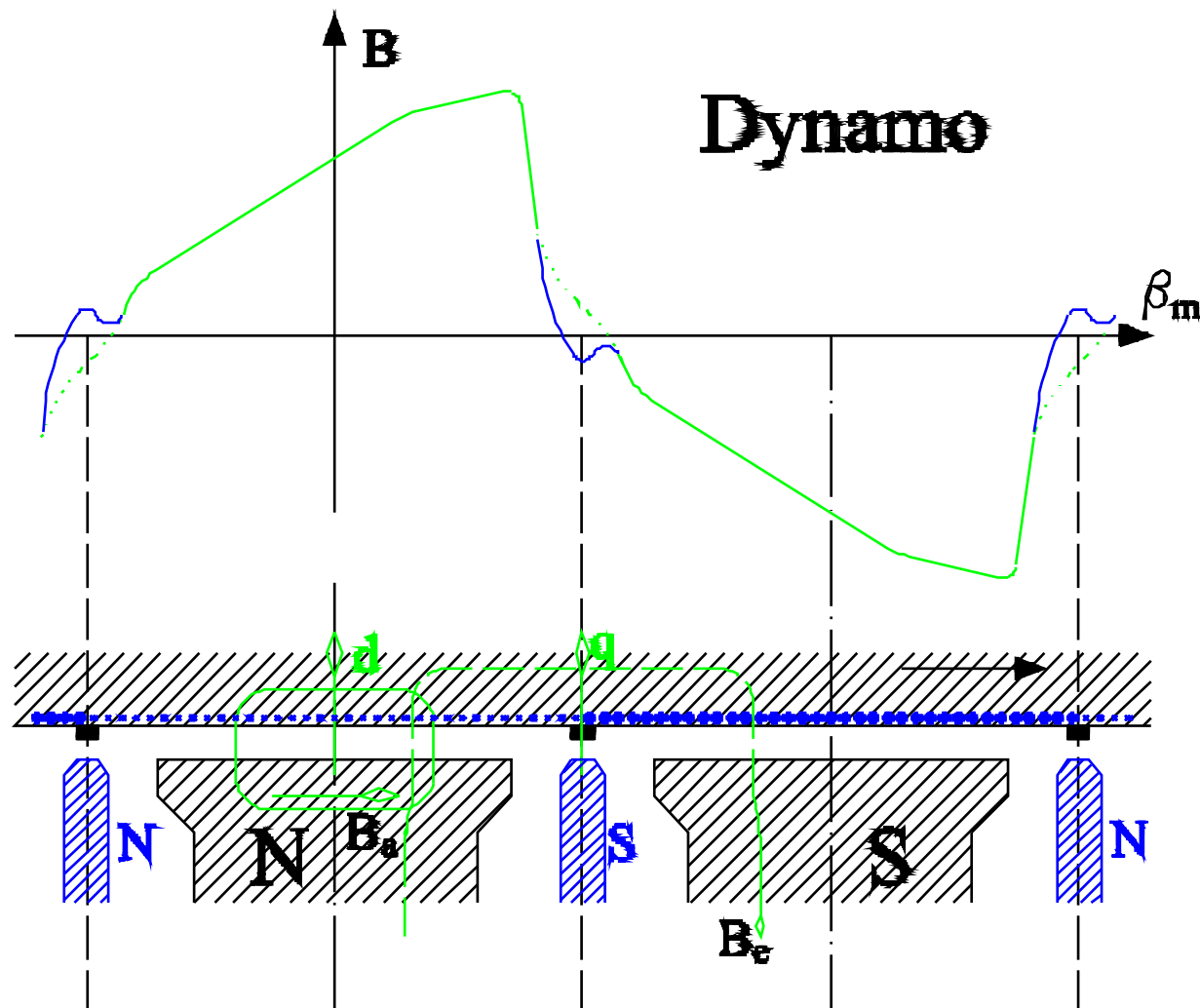
Commutation : cas général



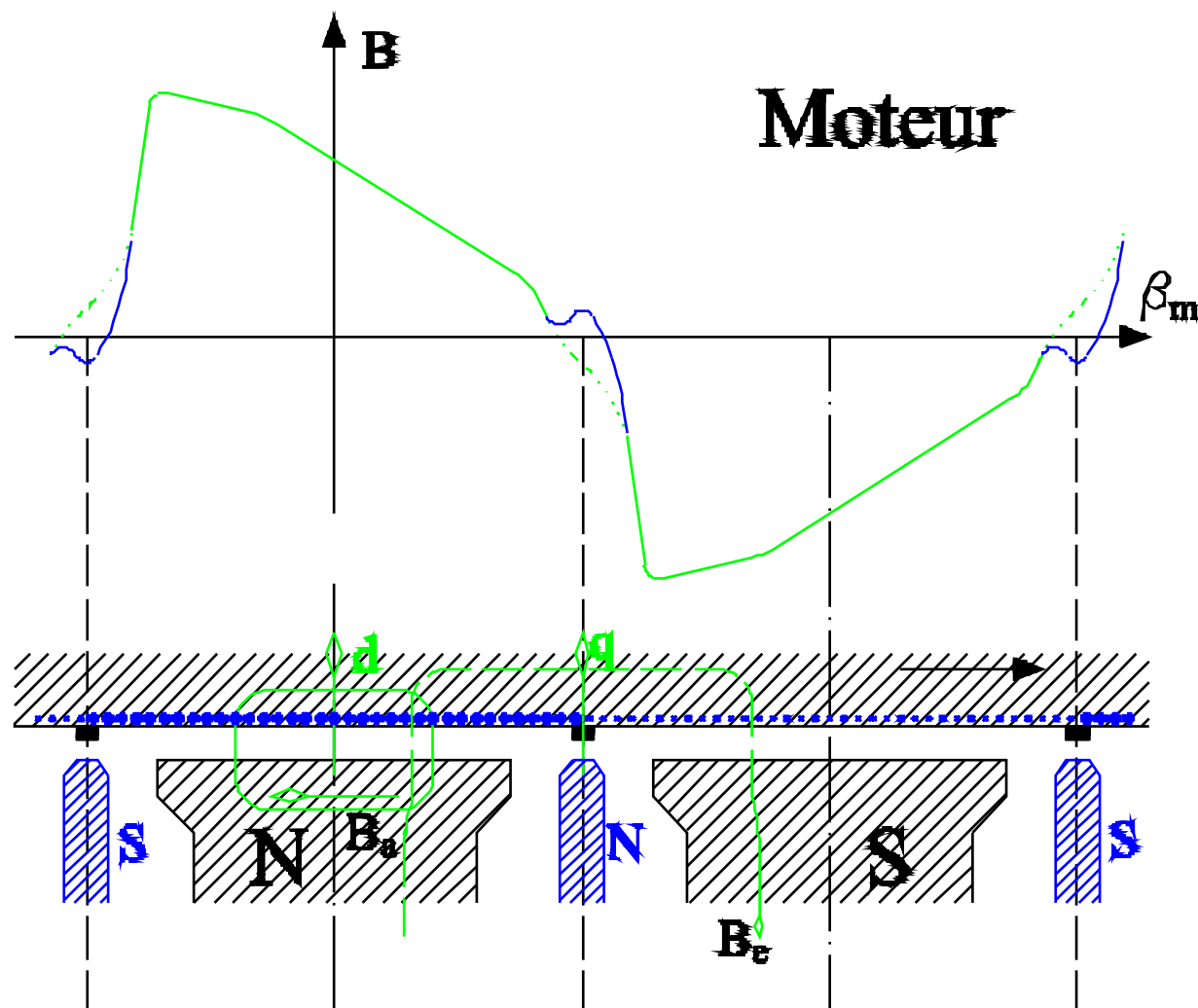
Pôles auxiliaires de commutation



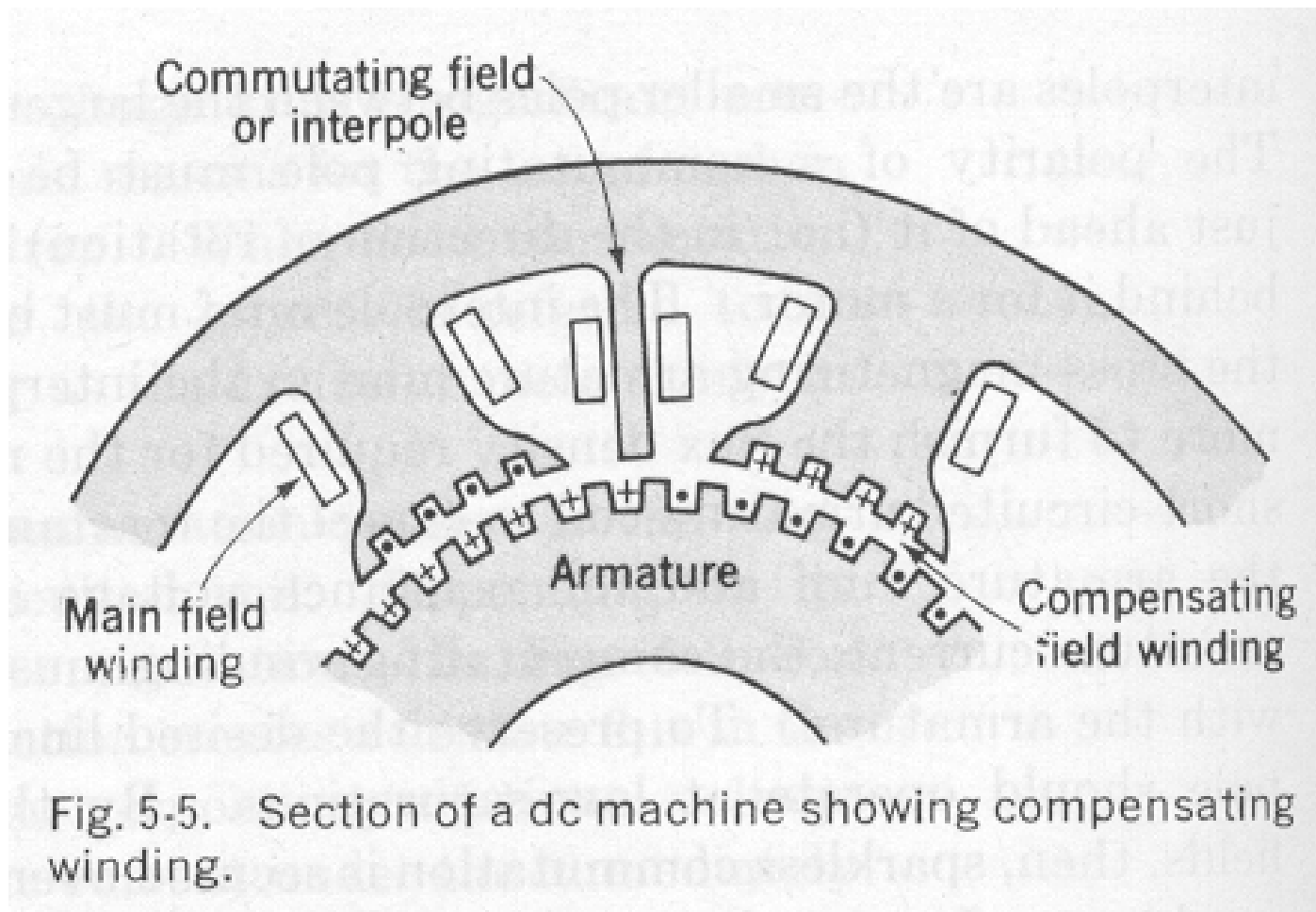
Pôles auxiliares de commutation



Pôles auxiliaires de commutation



Pôles de commutation et enroulement de compensation



Pôles de commutation et enroulement de compensation

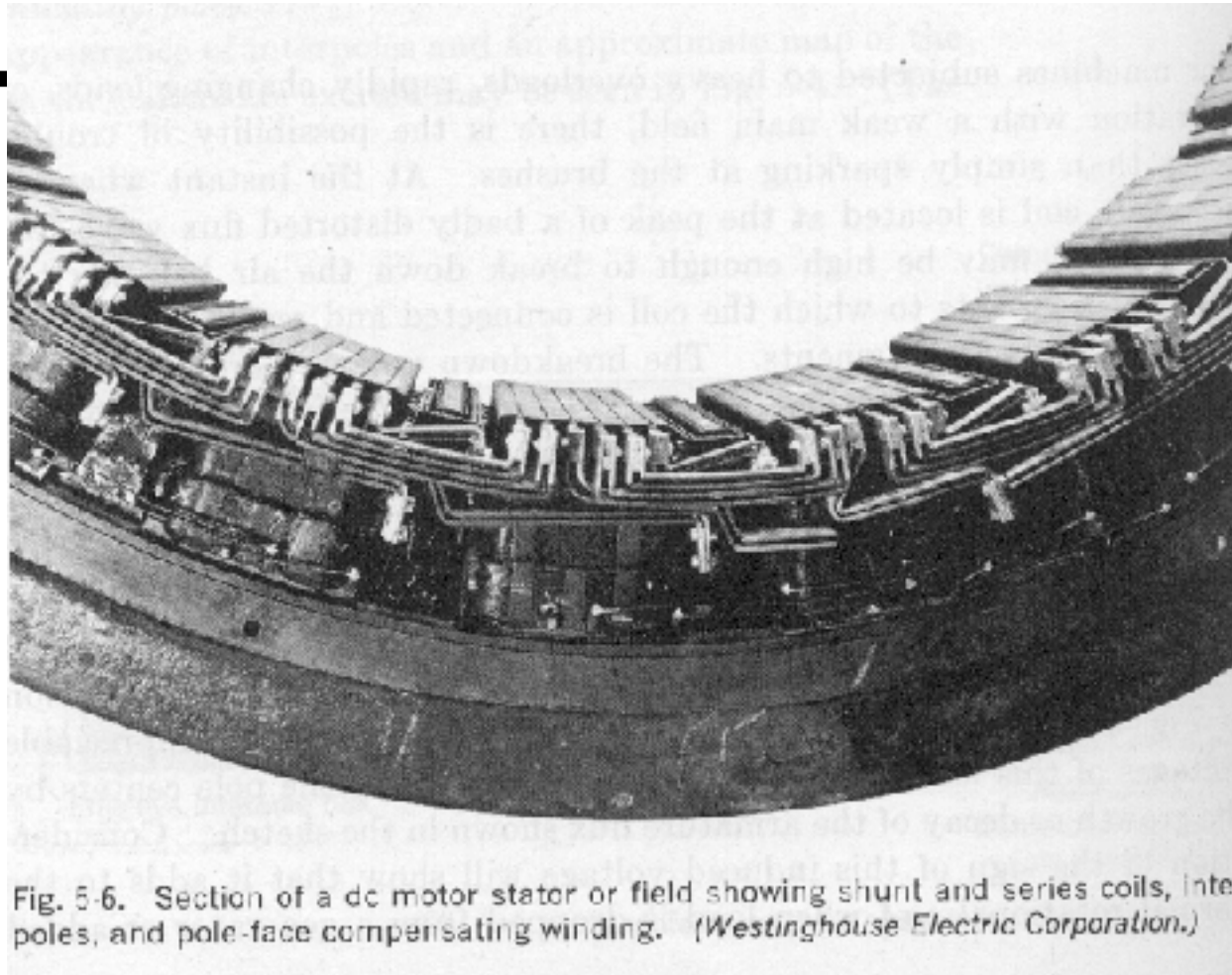


Fig. 5-6. Section of a dc motor stator or field showing shunt and series coils, interpoles, and pole-face compensating winding. (Westinghouse Electric Corporation.)

Equations électriques

Pour chacun des enroulements e et a , l'équation électrique s'écrit simplement :

$$\begin{aligned} v_e &= R_e i_e + D\Psi_e \\ v_a &= R_a i_a + D\Psi_a \end{aligned}$$

L'analyse détaillée faite par la méthode des champs montre qu'un couplage s'introduit entre les deux enroulements qui sont pourtant physiquement perpendiculaires.

Méthode des circuits

Enroulement d'excitation

$$\Psi_e = \Psi_e(i_e, i_a)$$

Le flux coupé par l'enroulement d'excitation (longitudinal) est influencé par le courant d'armature (transversal).

$$\begin{aligned} D\Psi_e &= \frac{\partial \Psi_e}{\partial i_e} Di_e + \frac{\partial \Psi_e}{\partial i_a} Di_a \\ &= L'_e Di_e + M' Di_a \end{aligned}$$

avec $L'_e(i_e, i_a)$ = valeur locale de l'inductance propre du circuit e

$M'(i_e, i_a)$ = valeur locale de l'inductance mutuelle entre les circuits e et a . *Elle est nulle pour un circuit linéaire*. Pour un sens de rotation donné, elle est négative en fonctionnement moteur et positive en fonctionnement dynamo puisque, dans les deux cas, une augmentation en valeur absolue de courant i_a amène une diminution du flux.

Méthode des circuits

Enroulement d'armature

$$\Psi_a = \Psi_a(\beta_m, i_e, i_a)$$

Le flux coupé par l'enroulement d'induit (transversal) dépend non seulement de β_m et de i_e comme à vide mais également du courant d'armature i_a .

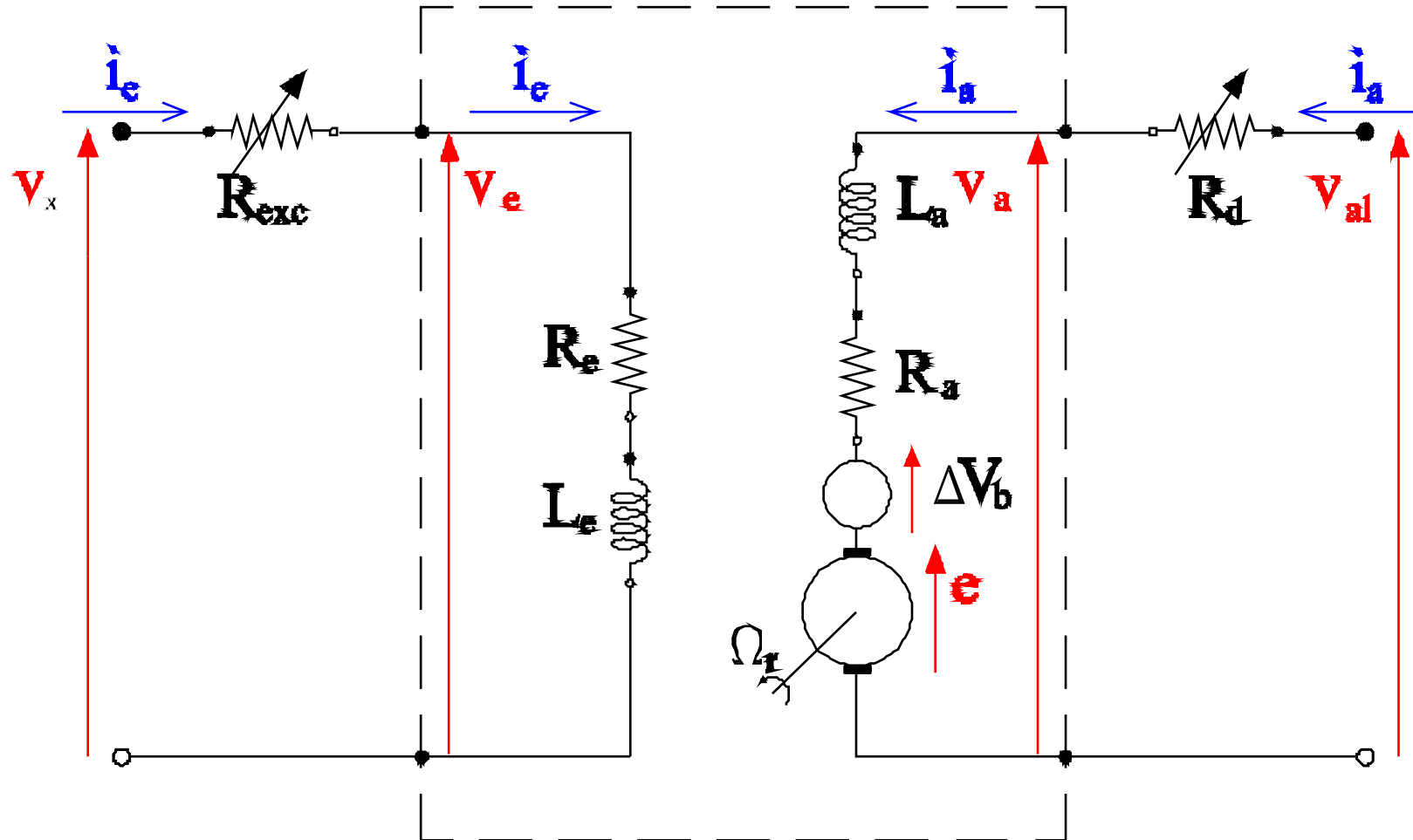
$$\begin{aligned} D\Psi_a &= \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_a} Di_a + \frac{\partial \Psi_a}{\partial i_e} Di_e + \frac{\partial \Psi_a}{\partial \beta_m} D\beta_m \\ &= L'_a Di_a + M' Di_e + G' i_e \Omega_r \end{aligned}$$

avec $L'_a(i_e, i_a) =$ valeur locale de l'inductance propre du circuit a pour $\beta = \pi/2$

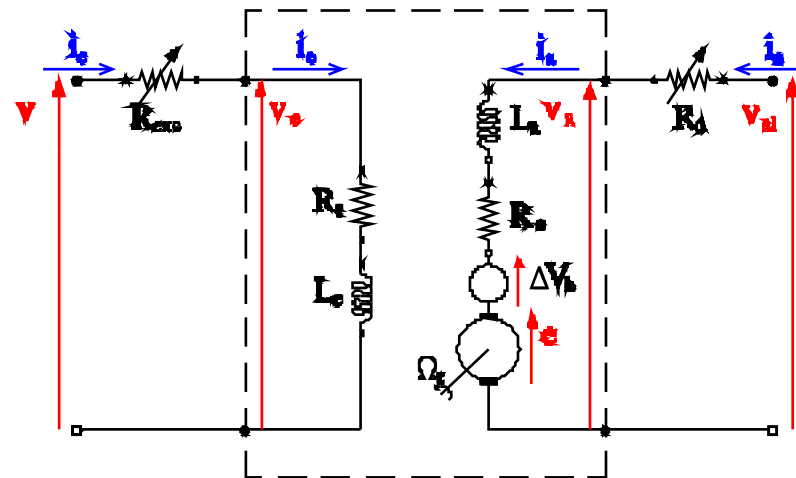
$G'(i_e, i_a) = G(i_e')$ où i_e' a été défini au paragraphe 4.2.3.

Méthode des circuits

Schéma équivalent



Modèle mathématique : équations



$$v_x = (R_e + R_{exc}) i_e + L_e \frac{di_e}{dt}$$

$$v_{al} = e + (R_a + R_d) i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$e = K \phi \Omega_r = G i_e \Omega_r$$

$$C_{em} = K \phi i_a = G i_e i_a$$

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} + C_r$$

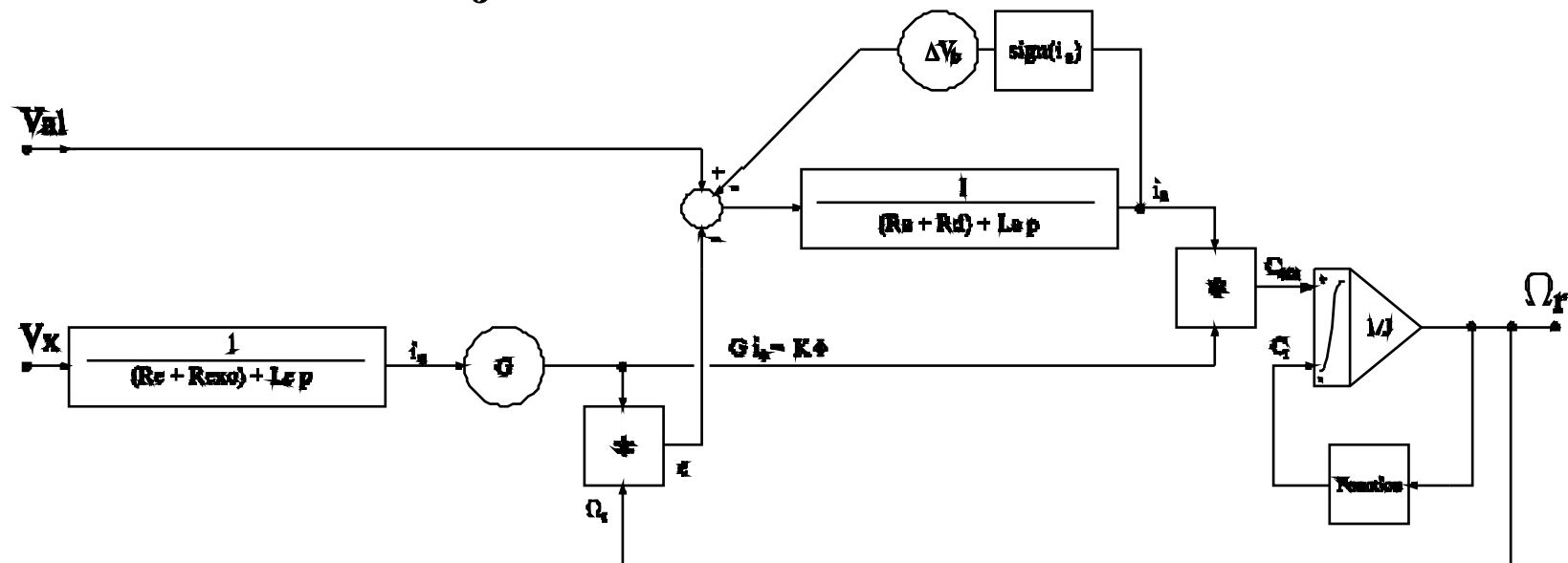
$$\text{avec : } -C_r = -C + C_{p \text{ méca}} + C_{p \text{ magn}}$$

Schéma bloc

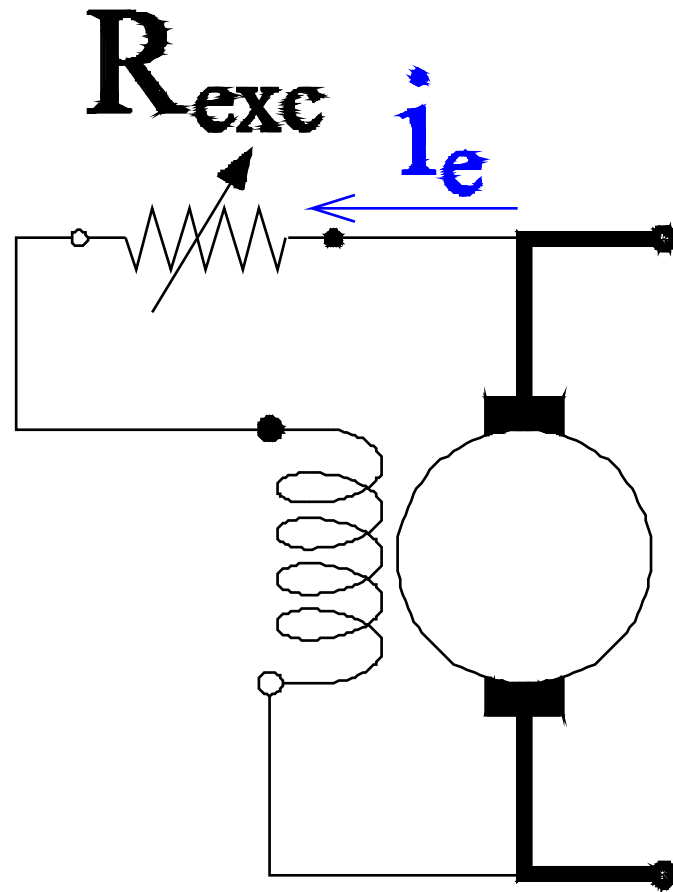
$$D i_e = \frac{1}{L_e} [v_x - (R_e + R_{exc}) i_e]$$

$$D i_a = \frac{1}{L_a} [v_{al} - G i_e \Omega_r - (R_a + R_d) i_a]$$

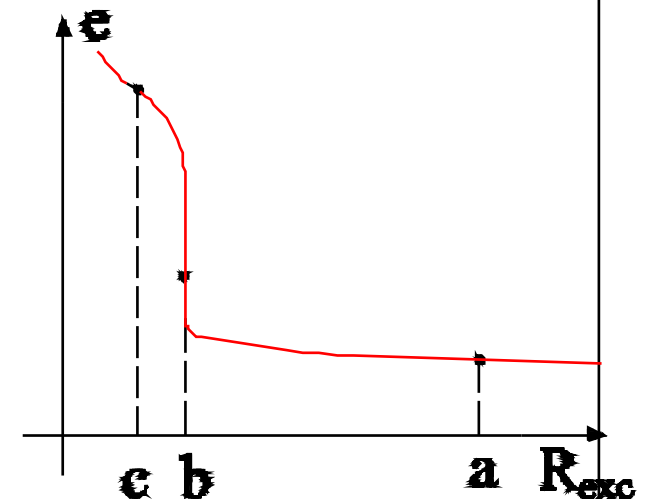
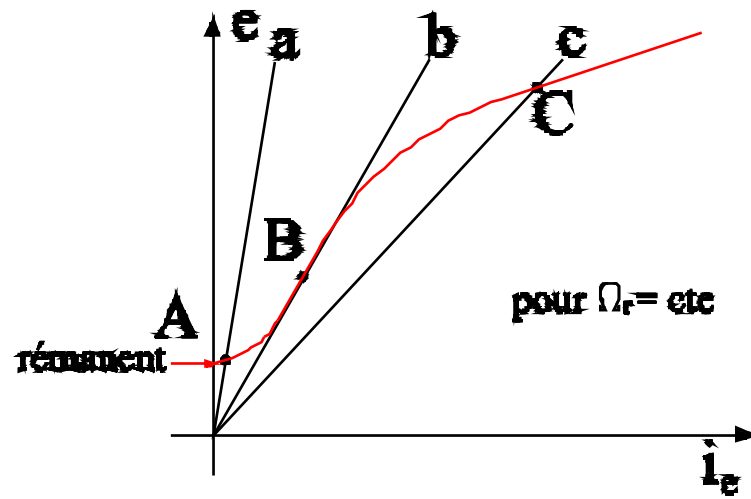
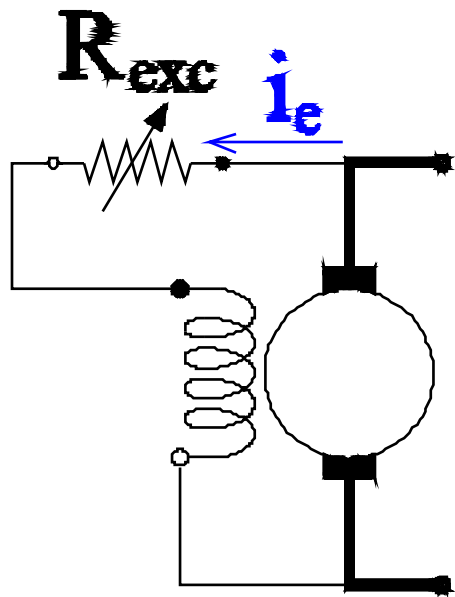
$$D \Omega_r = \frac{1}{J} [G i_e i_a - C_r (\Omega_r)]$$



La dynamo à excitation dérivée (ou shunt)



La dynamo à excitation dérivée (ou shunt)

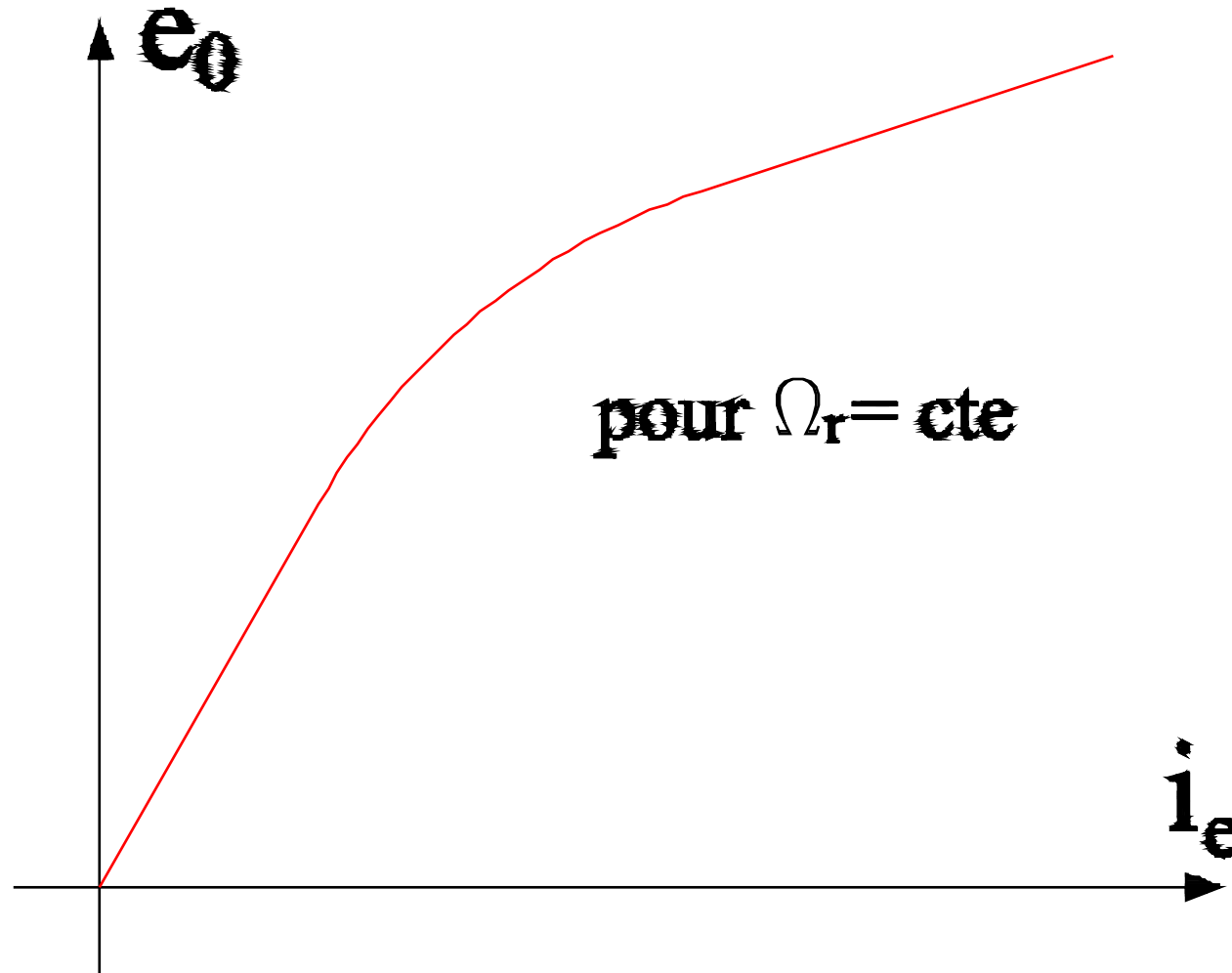


Les différents types de génératrices

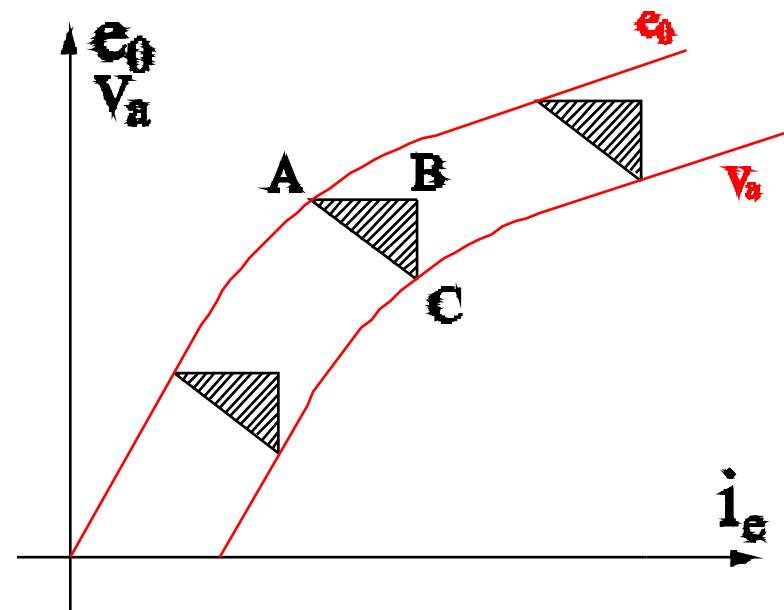
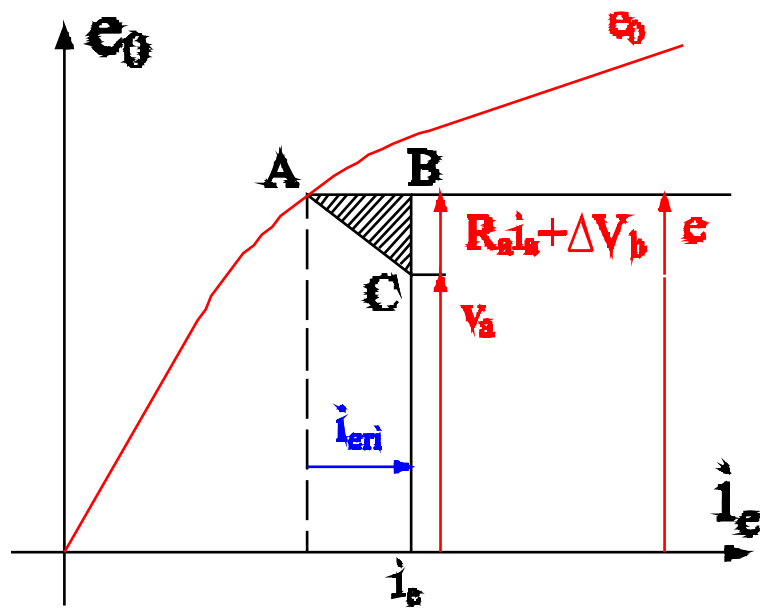
Dans la pratique, on rencontre :

- des génératrices à **excitation dérivée ou shunt** dont l'enroulement d'excitation est constitué par un nombre élevé N_e de spires dont les conducteurs de faible section sont parcourus par un courant de faible valeur.
- des génératrices à **excitation série** dont l'enroulement d'excitation est constitué par un faible nombre de spires dont les conducteurs, de section importante, sont parcourus par le courant d'armature ($i_e = i_a$).
- des génératrices à **excitation composée ou compound**.

F.e.m. à vide

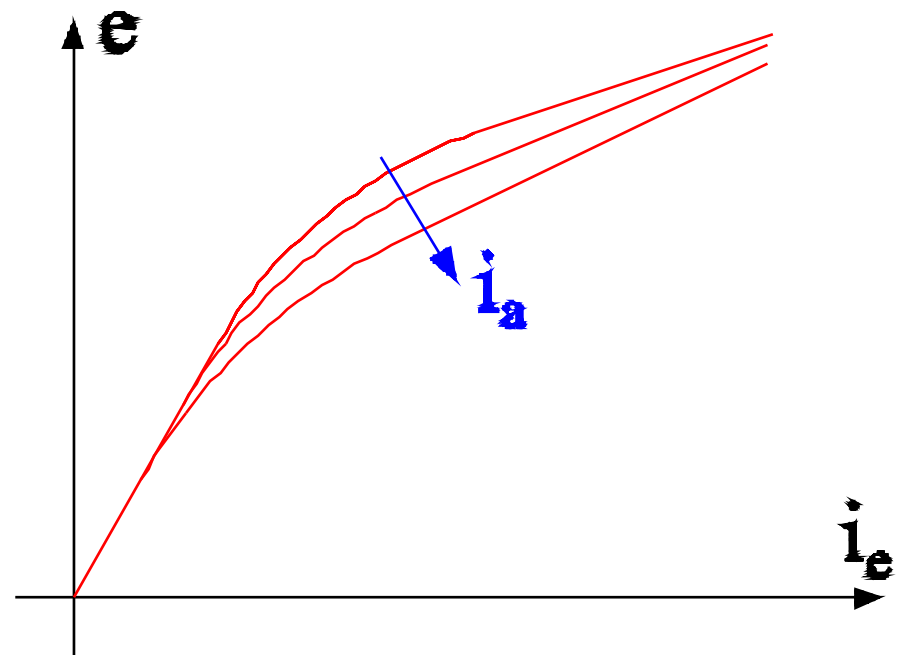
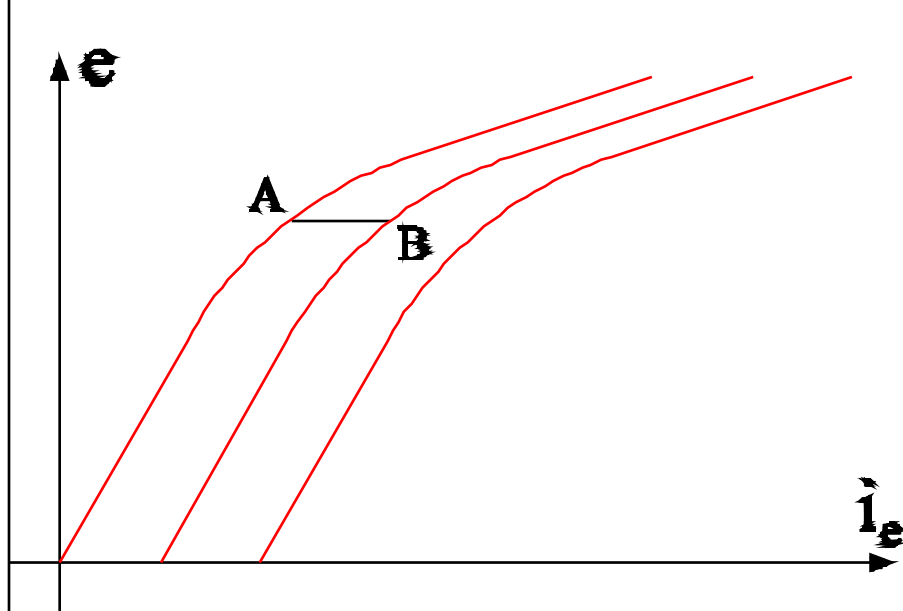


F.e.m. et tension en charge



Attention : conventions génératrice

F.e.m. en charge



Caractéristique à vide en moteur

$$\begin{aligned} V_{al} &= cte \\ R_d &= 0 \\ R_a &= cte \end{aligned}$$

Supposons connues :

la caractéristique à vide en génératrice relevée à la vitesse de référence Ω_g :

$$e_{0g} = f(i_e)$$

la famille de courbe des f.e.m. en charge :

$$e_g = f(i_e, i_a) \text{ pour différentes valeurs de } i_a.$$

Le courant absorbé est très faible (quelques % de i_{aM}) de sorte que la tension aux bornes est pratiquement égale à la f.e.m. à vide :

$$v_a = e + R_a i_a \approx e \approx e_0$$

or

$$e_0 = K \Phi(i_e) \Omega_r$$

donc

$$\Omega_r = \frac{e_0}{K \Phi(i_e)}$$

Pour la même valeur du courant d'excitation, la caractéristique à vide en génératrice tracée à la vitesse Ω_g donne :

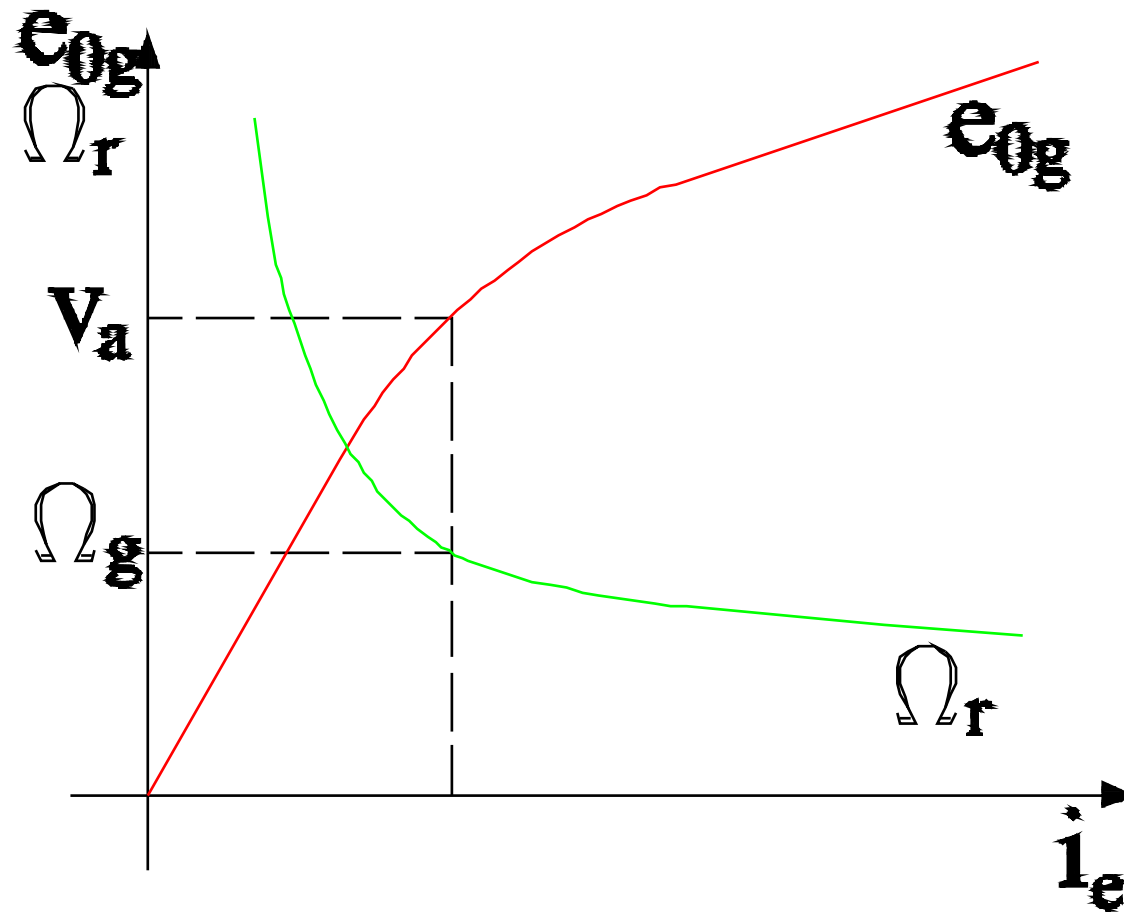
$$e_{0g} = K \Phi(i_e) \Omega_g$$

donc

$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_{0g}(i_e)}$$

Caractéristique à vide en moteur

$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_{0g}(i_e)}$$



$$\Omega_r = f(i_a)$$

$$\begin{aligned} v_a &= e + R_a i_a \\ e &= K \Phi \Omega_r \\ C_{em} &= K \Phi i_a \\ -C &= C_{em} - C_p \\ e_g &= f(i_e, i_a) \text{ à } \Omega_g \text{ donné} \\ K \Phi &= \frac{e}{\Omega_r} = \frac{e_g}{\Omega_g} \end{aligned}$$

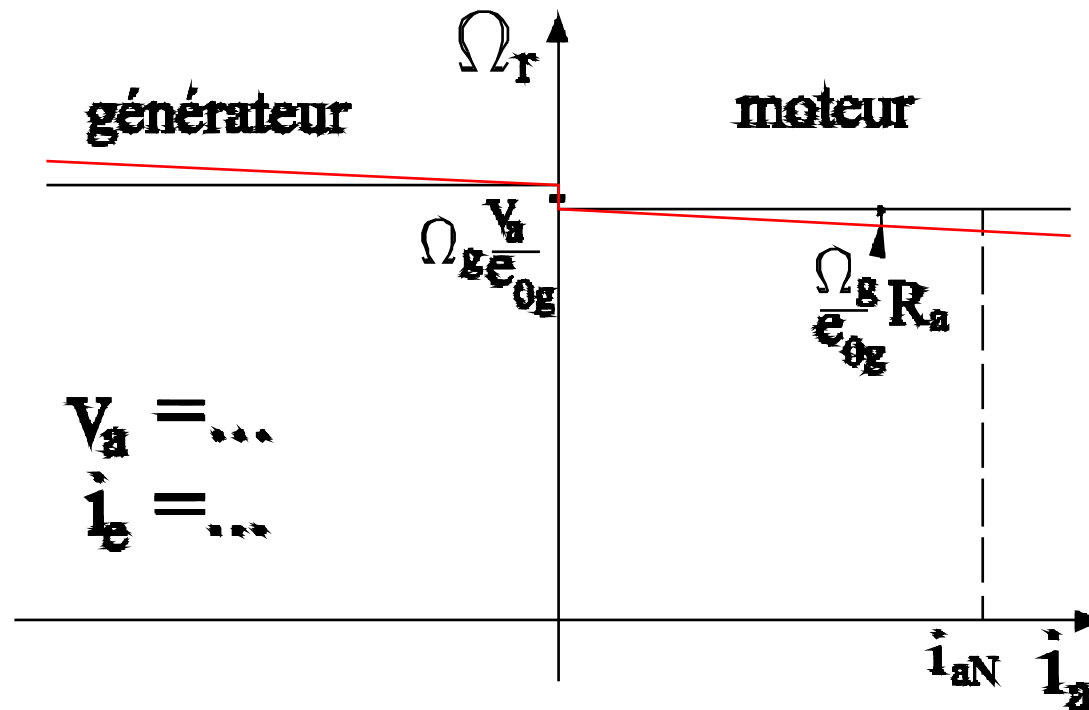
$$\begin{aligned} \Omega_r &= \frac{e}{K \Phi} \\ &= \frac{v_a - R_a i_a}{e_g / \Omega_g} \\ &= \Omega_g \frac{v_a - R_a i_a}{e_g(i_e, i_a)} \end{aligned}$$

Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

$$\Omega_r = f(i_a)$$

Réaction d'induit négligeable

$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_{0g}(i_e)} - \Omega_g \frac{R_a i_a}{e_{0g}(i_e)}$$

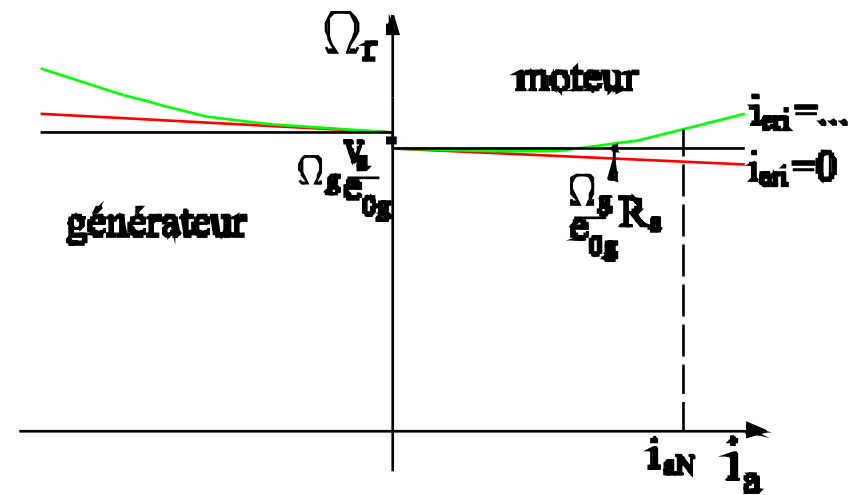
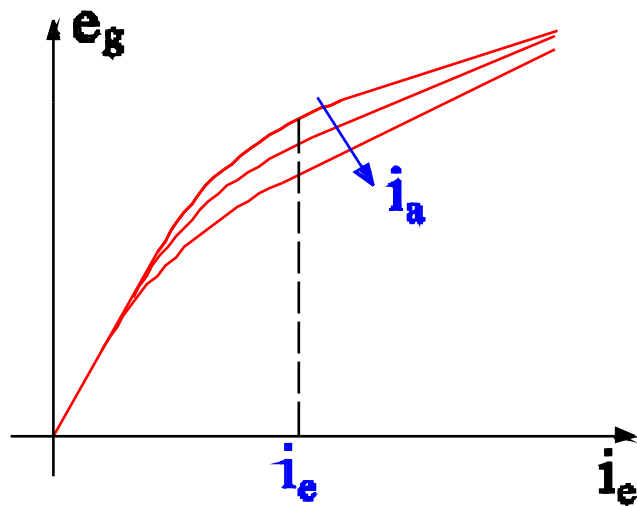


Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

$$\Omega_r = f(i_a)$$

Réaction d'induit démagnétisante

$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v_a}{e_g(i_e, i_a)} - \Omega_g \frac{R_a i_a}{e_g(i_e, i_a)}$$



Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

$$-C = f(i_a)$$

$$\begin{aligned} v_a &= e + R_a i_a \\ e &= K \Phi \Omega_r \\ C_{em} &= K \Phi i_a \\ -C &= C_{em} - C_p \\ e_g &= f(i_e, i_a) \text{ à } \Omega_g \text{ donné} \\ K \Phi &= \frac{e}{\Omega_r} = \frac{e_g}{\Omega_g} \end{aligned}$$

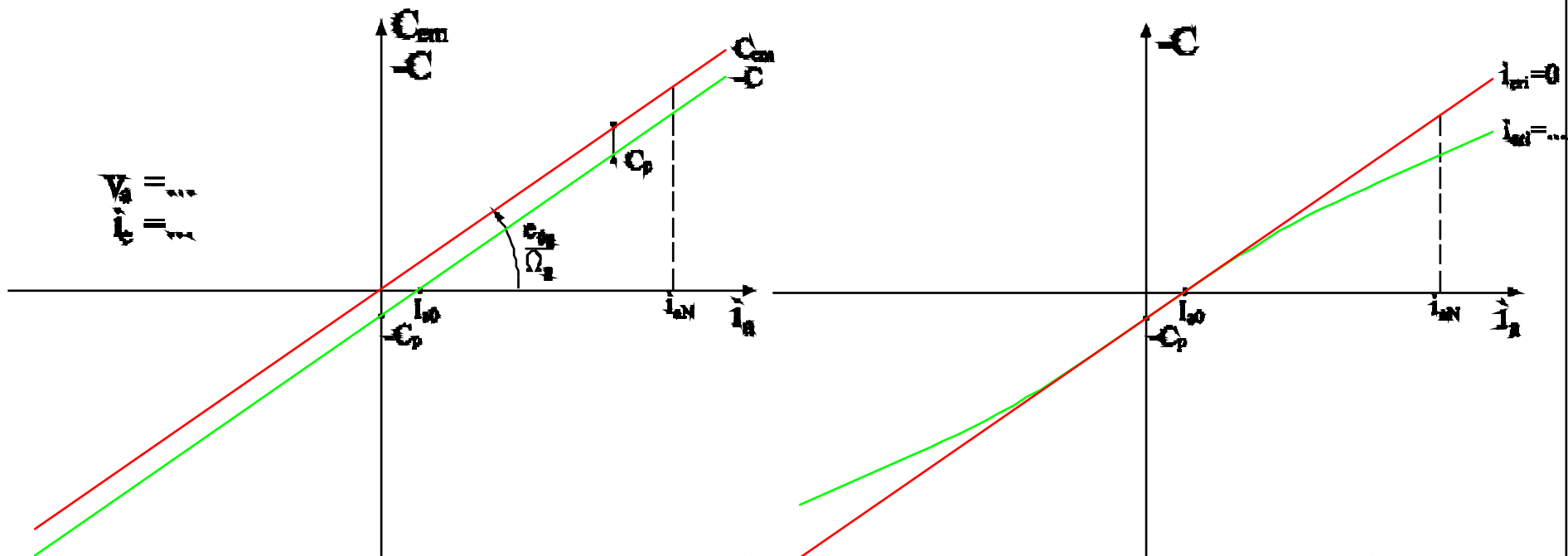
$$\begin{aligned} C_{em} &= K \Phi i_a = \frac{e_g(i_e, i_a)}{\Omega_g} i_a \\ -C &= C_{em} - C_p \end{aligned}$$

Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

$$-C = f(i_a)$$

$$C_{em} = K \Phi i_a = \frac{e_g(i_e, i_a)}{\Omega_g} i_a$$

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



Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

-C = f(Ω_r) : caractéristique mécanique

$$\begin{aligned} v_a &= e + R_a i_a \\ e &= K \Phi \Omega_r \\ C_{em} &= K \Phi i_a \\ -C &= C_{em} - C_p \\ e_g &= f(i_e, i_a) \text{ à } \Omega_g \text{ donné} \\ K \Phi &= \frac{e}{\Omega_r} = \frac{e_g}{\Omega_g} \end{aligned}$$

or

$$-C = C_{em} - C_p = \frac{e_g}{\Omega_g} i_a - C_p$$

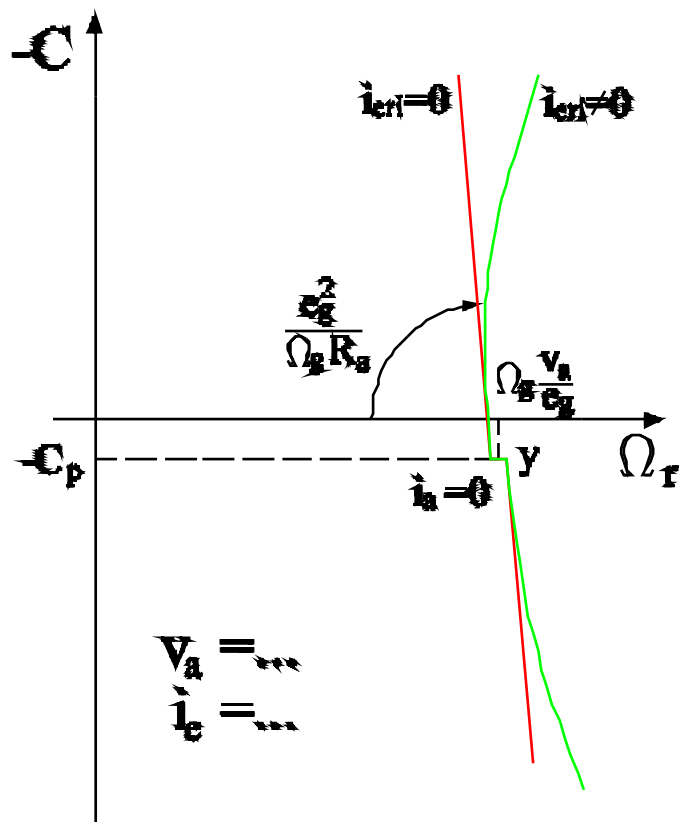
$$i_a = \frac{v_a - e}{R_a}$$

donc

$$\begin{aligned} -C &= \frac{e_g}{\Omega_g R_a} \left(v_a - \frac{e_g}{\Omega_g} \Omega_r \right) - C_p \\ &= \frac{e_g}{\Omega_g R_a} v_a - \frac{e_g^2}{\Omega_g^2 R_a} \Omega_r - C_p \end{aligned}$$

Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

-C = f(Ω_r) : caractéristique mécanique



$$-C = C_{em} - C_p = \frac{e_g}{\Omega_g} i_a - C_p$$

or

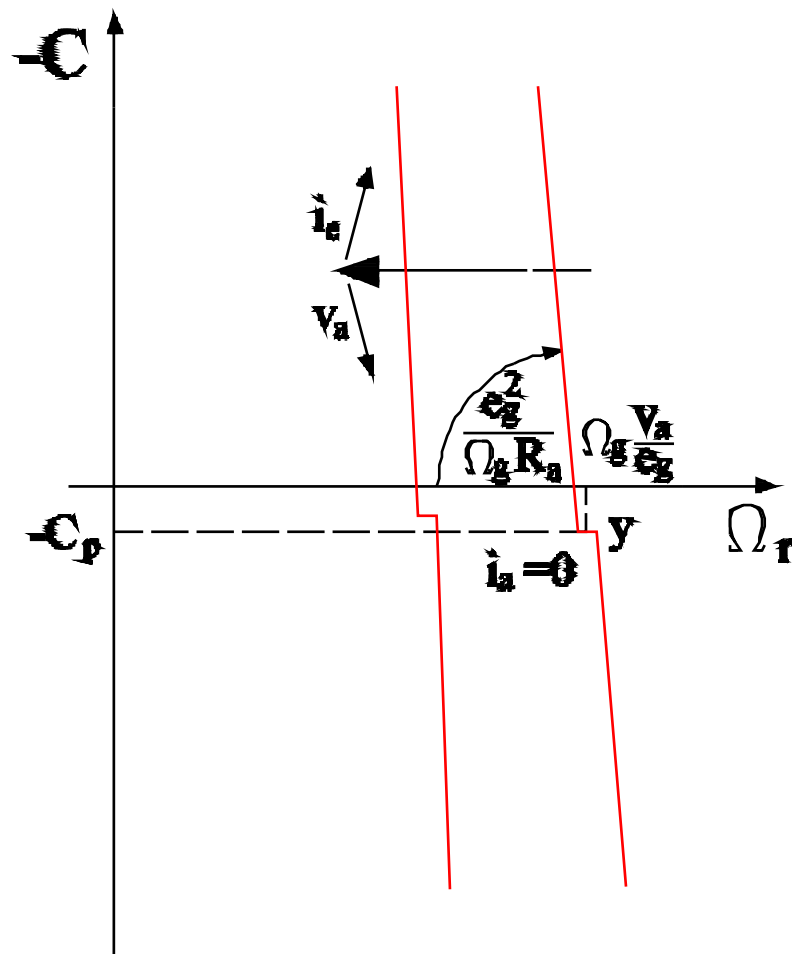
$$i_a = \frac{v_a - e}{R_a}$$

donc

$$\begin{aligned} -C &= \frac{e_g}{\Omega_g R_a} \left(v_a - \frac{e_g}{\Omega_g} \Omega_r \right) - C_p \\ &= \frac{e_g}{\Omega_g R_a} v_a - \frac{e_g^2}{\Omega_g^2 R_a} \Omega_r - C_p \end{aligned}$$

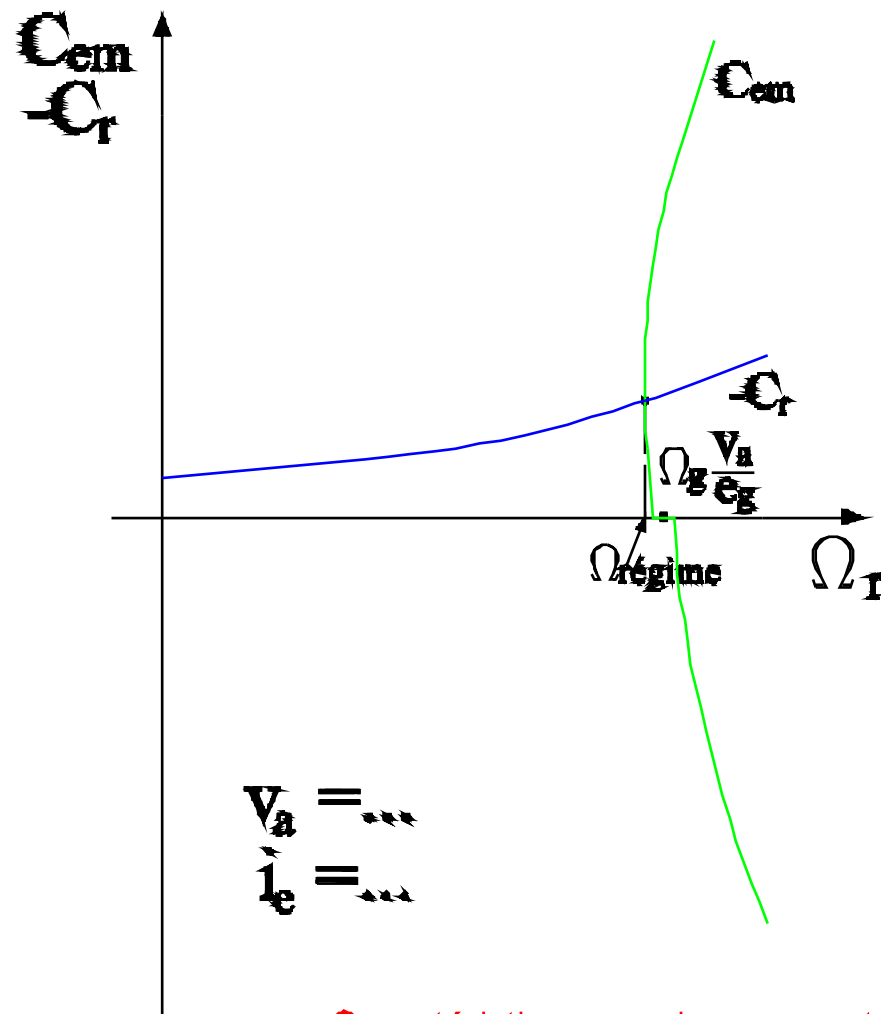
Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

Action des variables de commande



Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

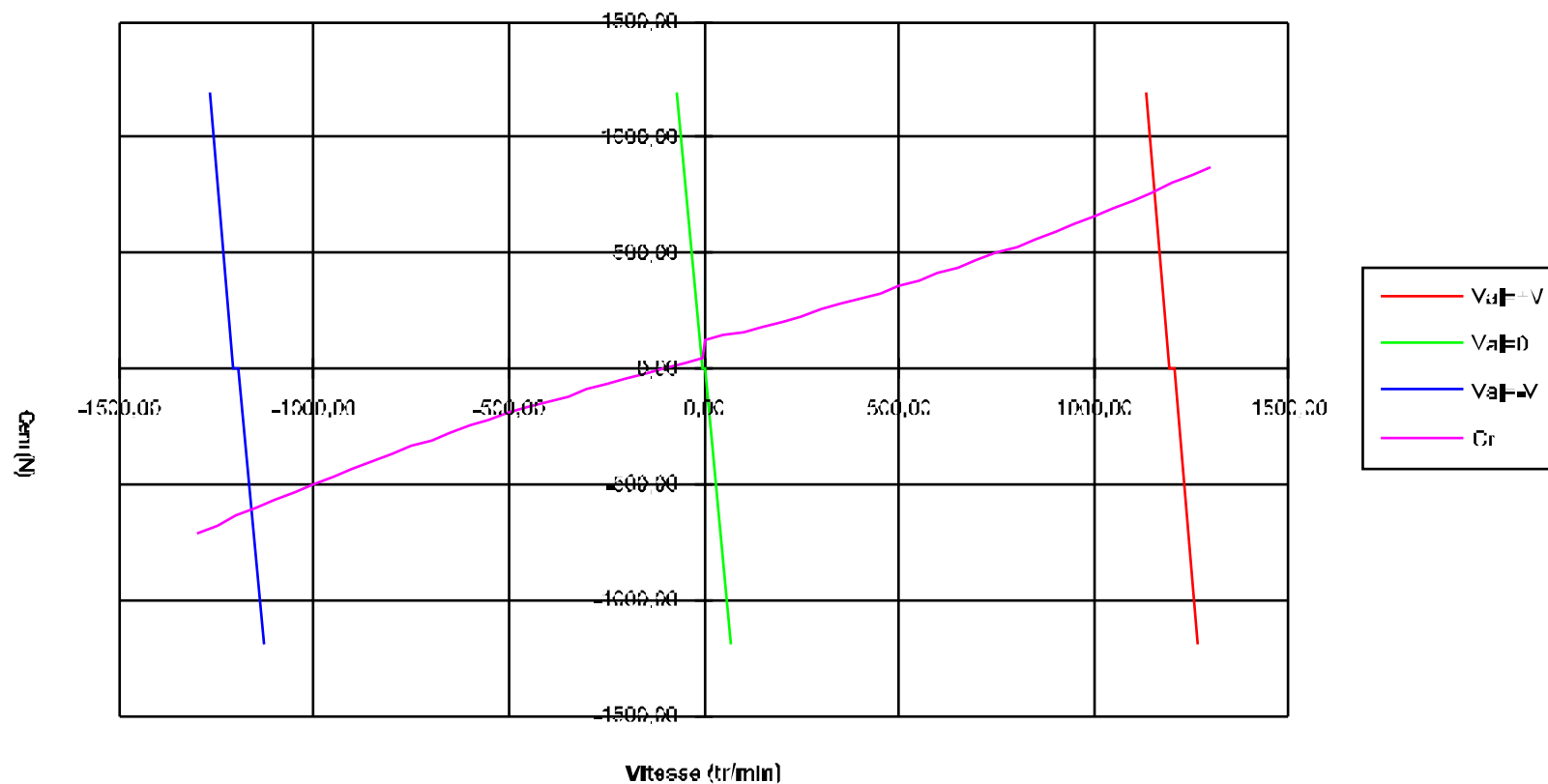
Vitesse de régime d'un moteur



Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

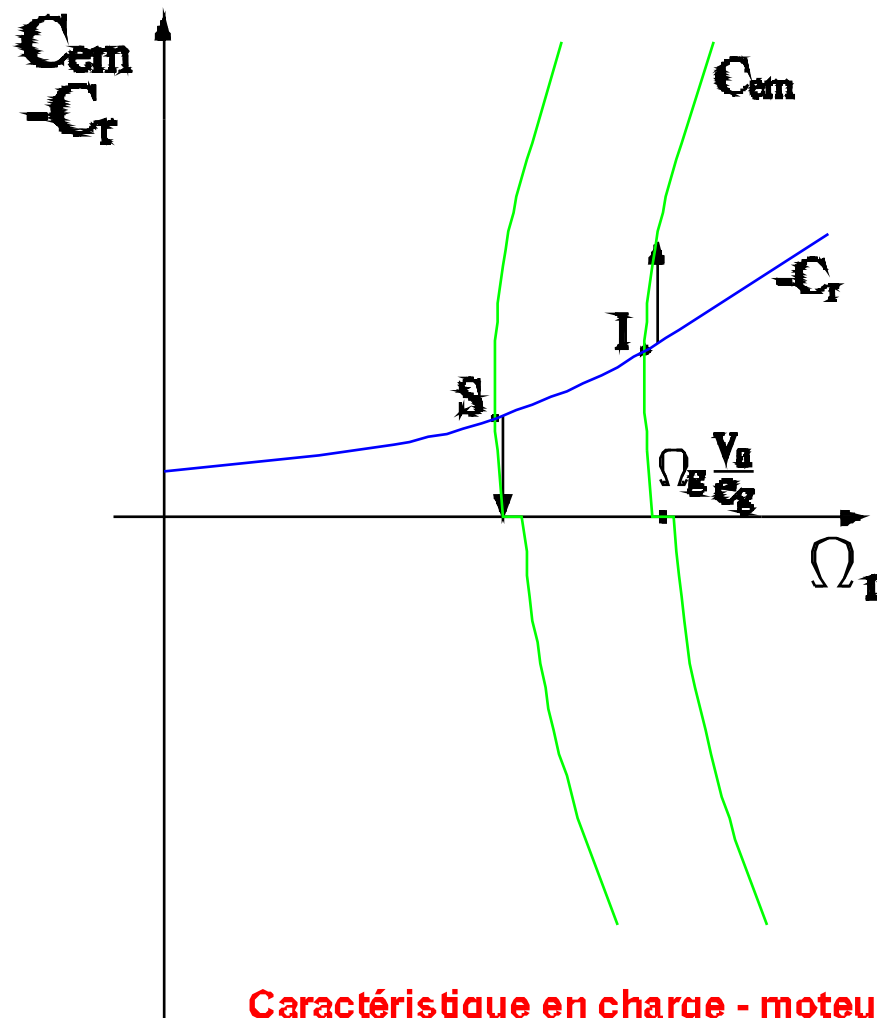
Vitesse de régime d'un moteur

Caractéristique mécanique d'un moteur à excitation indépendante



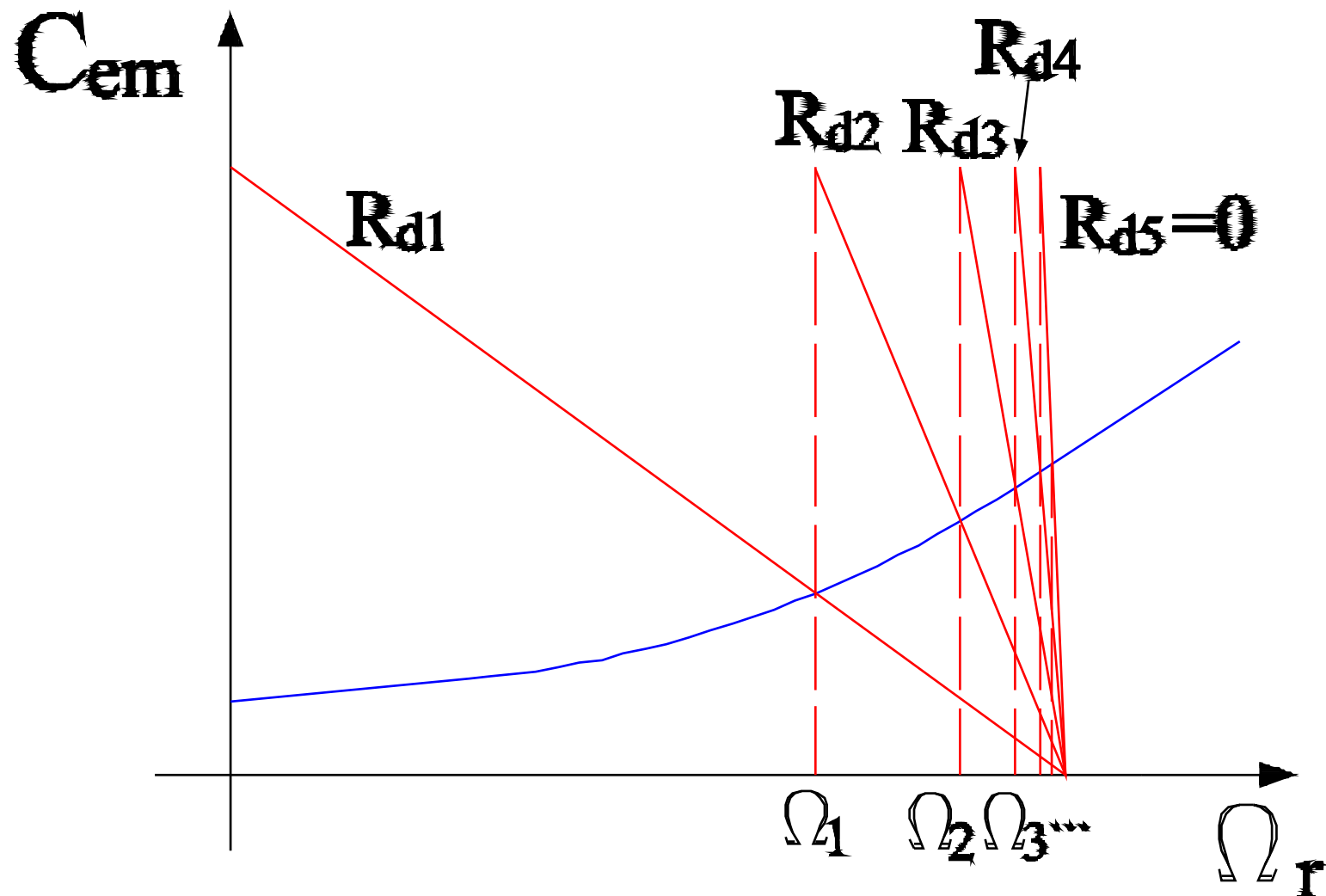
Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

Stabilité du point de fonctionnement

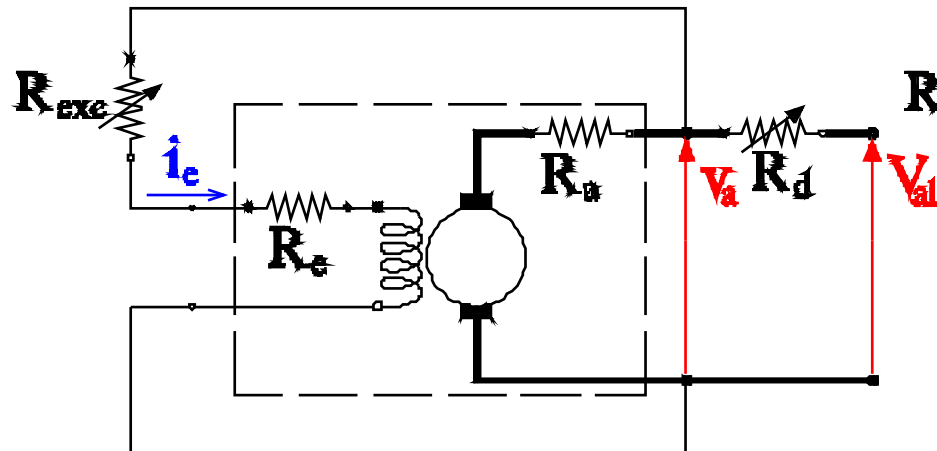


Caractéristique en charge - moteur à excitation indépendante

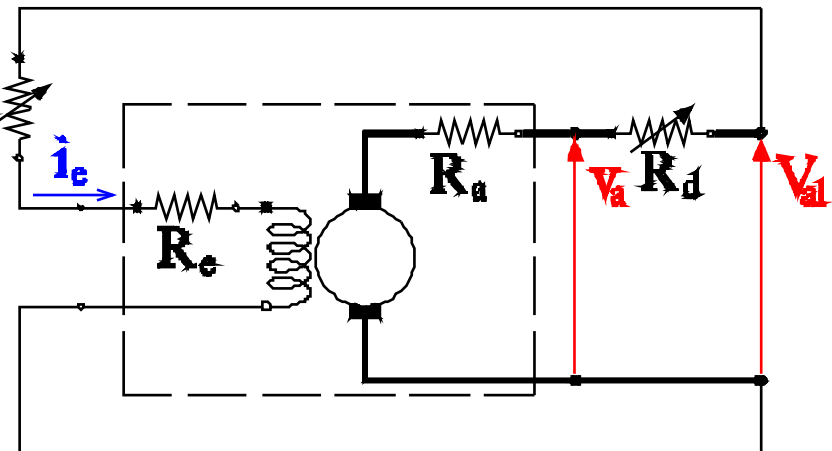
Rhéostat de démarrage



Branchement de l'excitation



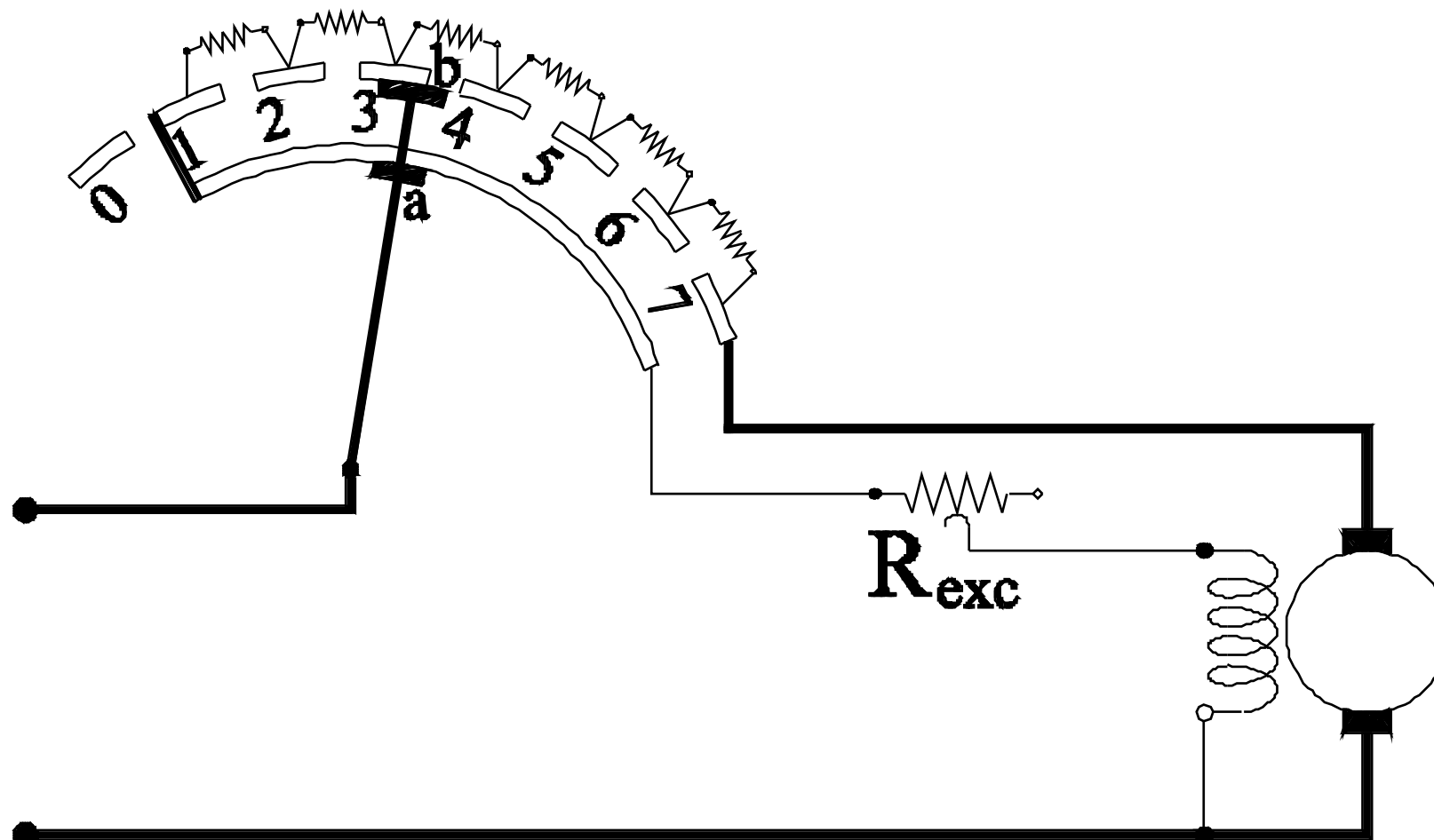
MAUVAIS



BON

Moteur à excitation dérivée

Rhéostat de démarrage



Moteur à excitation dérivée

Définitions

Facteur de shuntage de l'excitation :

$$K_{se} = \frac{R_{exc} + R_s}{R_{exc}} = 1 + \frac{R_s}{R_{exc}}$$

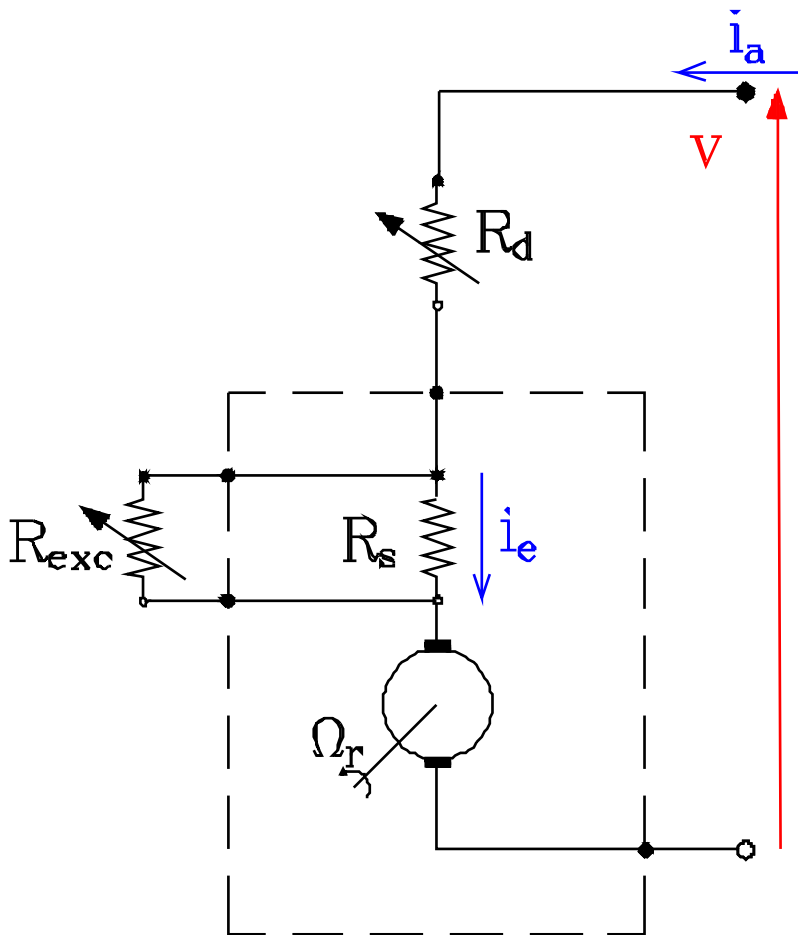
La relation existant entre le courant d'armature i_a et le courant d'excitation i_e s'écrit:

$$i_e = \frac{R_{exc}}{R_{exc} + R_s} i_a = \frac{i_a}{K_{se}}$$

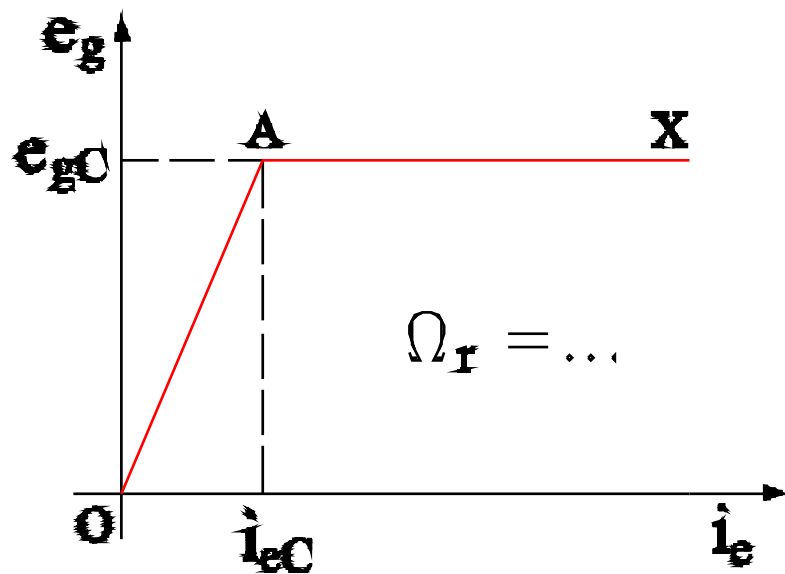
et

$$R_s \parallel R_{exc} = \frac{R_s}{K_{se}}$$

Moteur à excitation série



Caractéristique à vide en génératrice



* pour $i_e < i_{eC}$ - zone non saturée:

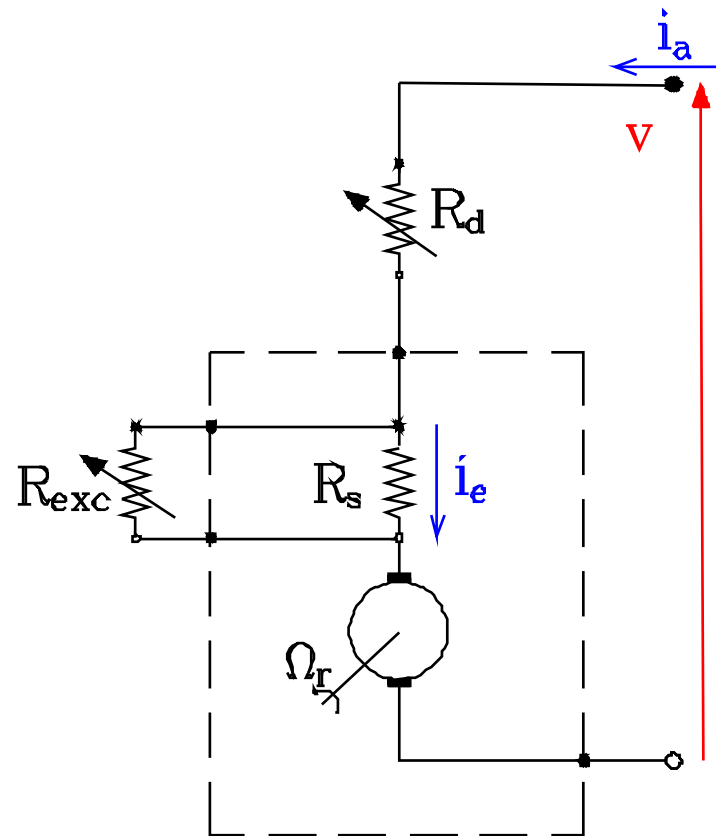
$$e_g = G \Omega_g i_e = G \Omega_g \frac{i_a}{K_{se}}$$

* pour $i_e > i_{eC}$ - zone saturée: :

$$e_g = G i_{eC} \Omega_g = e_{gC}$$

Moteur à excitation série

$$\Omega_r = f(i_a)$$



$$\Omega_r = \frac{e}{K \phi} = \Omega_g \frac{v - (R_d + R_a + R_s // R_{exc}) i_a}{e_g(i_e)}$$

Moteur à excitation série

$$\Omega_r = f(i_a)$$

$$\Omega_r = \frac{e}{K \phi} = \Omega_g \frac{v - (R_d + R_a + R_s // R_{exc}) i_a}{e_g(i_e)}$$

* zone non saturée : pour $i_a < K_{se} i_{eC}$

$$\begin{aligned} \Omega_r &= \Omega_g \frac{v - (R_d + R_a + R_s // R_{exc}) i_a}{G \Omega_g \frac{i_a}{K_{se}}} \\ &= \frac{K_{se}}{G} \left\{ \frac{v}{i_a} - (R_d + R_a + \frac{R_s}{K_{se}}) \right\} \end{aligned}$$

* zone saturée : pour $i_a > K_{se} i_{eC}$

$$\begin{aligned} \Omega_r &= \Omega_g \frac{v - (R_d + R_a + R_s // R_{exc}) i_a}{G \Omega_g \frac{i_{eC}}{K_{se}}} \\ &= \frac{v}{G i_{eC}} - (R_d + R_a + \frac{R_s}{K_{se}}) \frac{i_a}{G i_{eC}} \end{aligned}$$

Moteur à excitation série

$$\Omega_r = f(i_a)$$

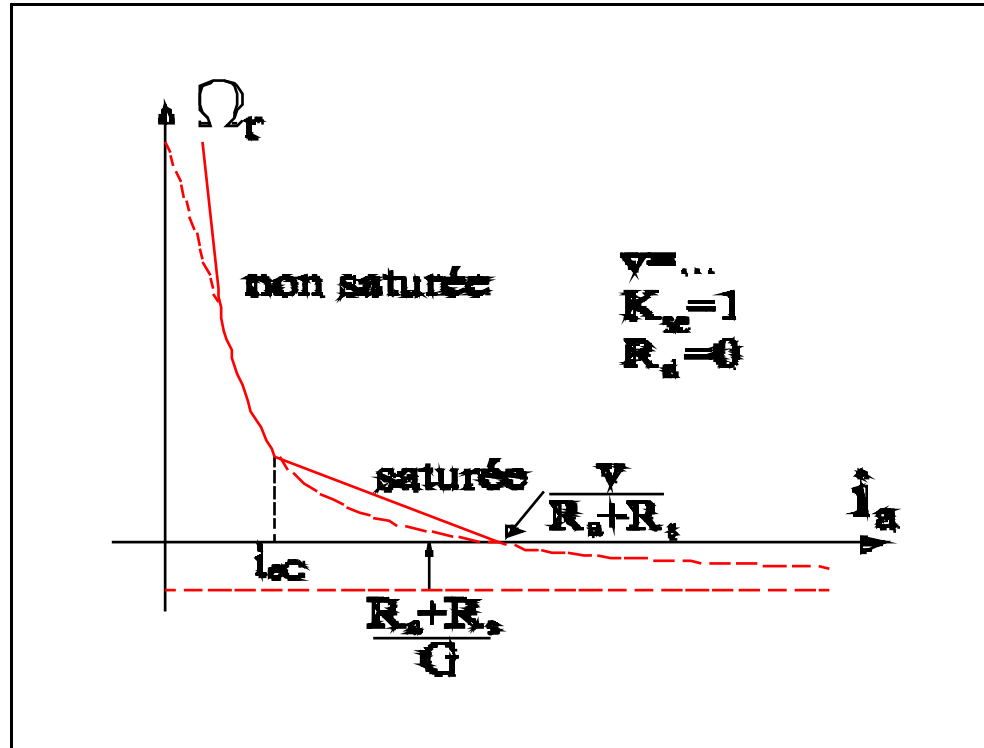
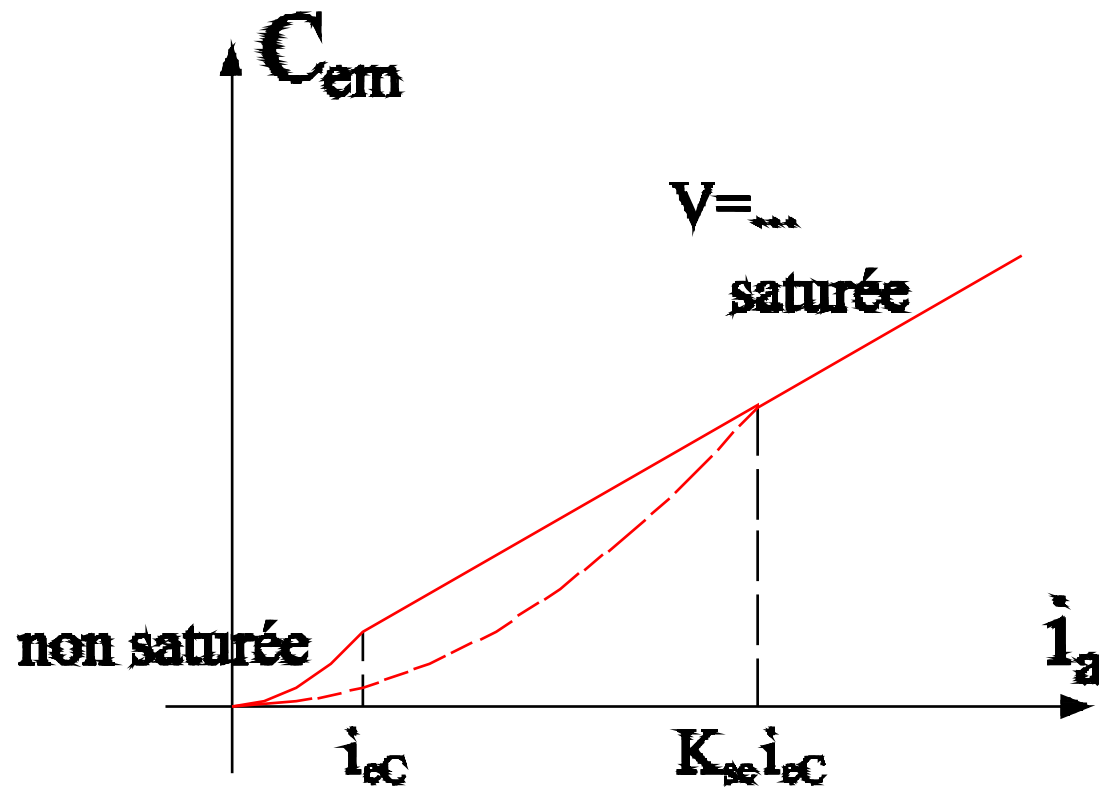


Figure 4.5 - 21

Moteur à excitation série

$$C_{em} = f(i_a)$$



Moteur à excitation série

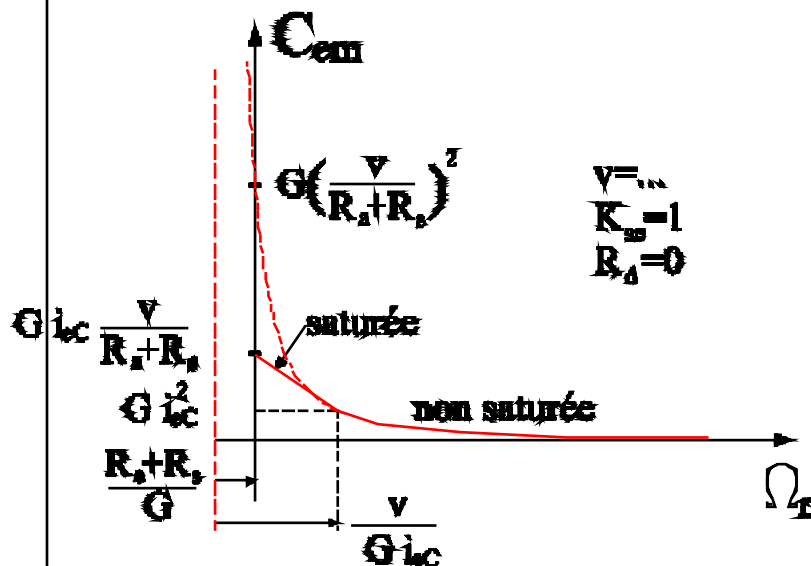
$C_{em} = f(\Omega_r)$: caractéristique mécanique

* zone non saturée :

$$C_{em} = G \frac{i_a^2}{K_{se}} = \frac{G}{K_{se}} \left(\frac{v}{G \frac{\Omega_r}{K_{se}} + R_d + R_a + \frac{R_s}{K_{se}}} \right)^2$$

* zone saturée :

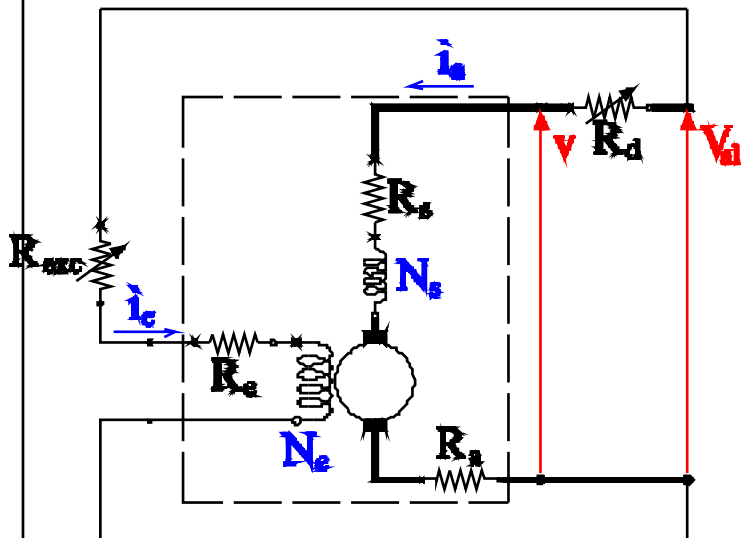
$$C_{em} = G i_{eC} i_a = \frac{G^2 i_{eC}^2}{R_d + R_a + \frac{R_s}{K_{se}}} \left(\frac{v}{G i_{eC}} - \Omega_r \right)$$



Moteur à excitation série

Le “compoundage”

$$\Omega_r = \Omega_g \frac{v - (R_a + R_s) i_a}{e_g(i_e')}$$



avec

$$i_e' = i_e \pm \frac{N_s}{N_e} i_a$$

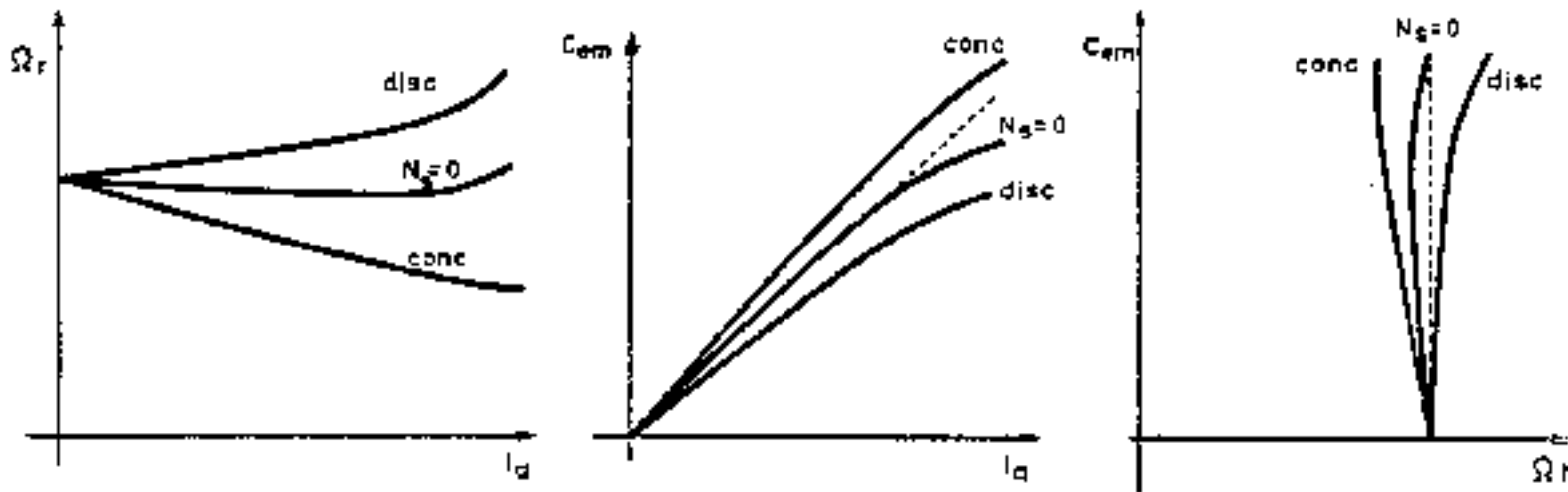
Pour une valeur donnée de i_e , par rapport au cas $N_s = 0$, à chaque valeur de i_a correspond

- une valeur de i_e' augmentée ou diminuée ;
- une valeur de Ω_r diminuée ou augmentée ;
- une valeur de C_{em} augmentée ou diminuée

selon que les spires séries sont **concordantes** ou **discordantes**.

Moteur à excitation composée

Le “compoundage”



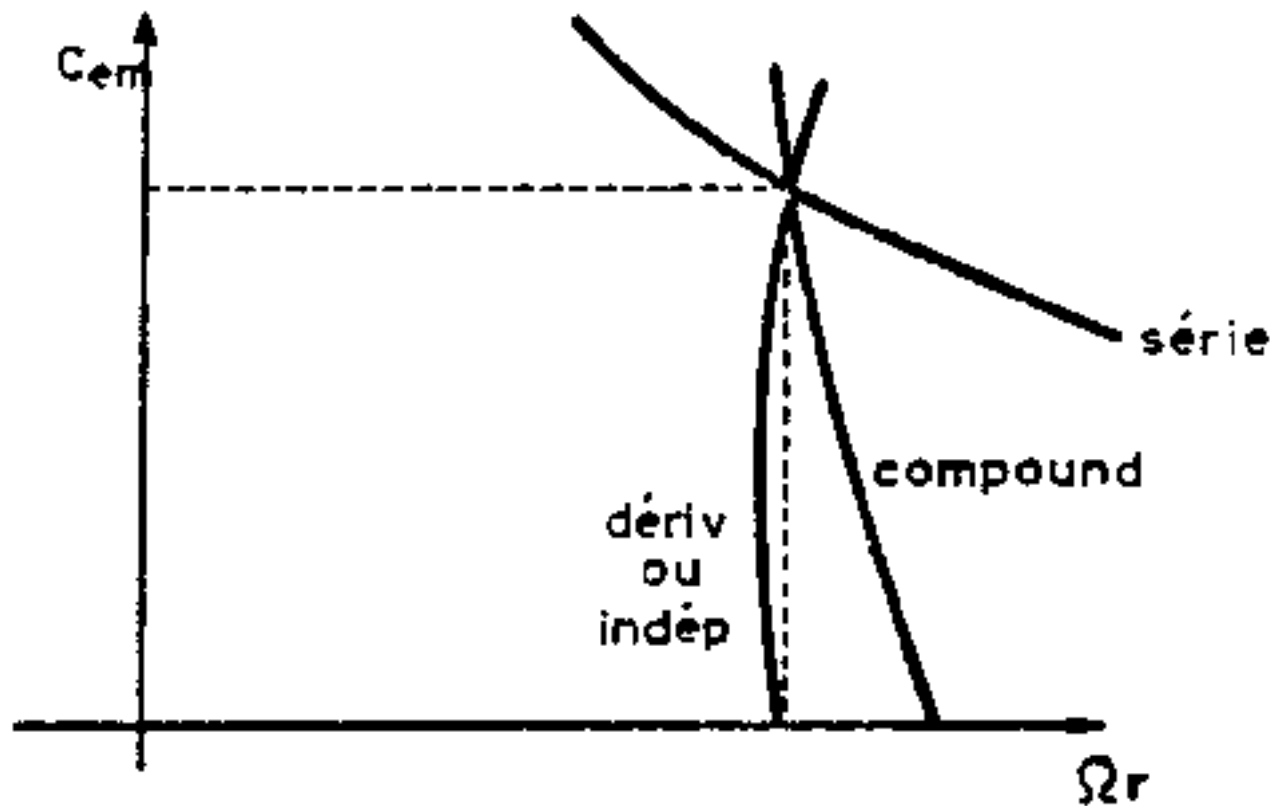
Pour une valeur donnée de i_e , par rapport au cas $N_s = 0$, à chaque valeur de i_a correspond

- une valeur de i_e' augmentée ou diminuée ;
- une valeur de Ω_r diminuée ou augmentée ;
- une valeur de C_{em} augmentée ou diminuée

selon que les spires séries sont **concordantes** ou **discordantes**.

Moteur à excitation composée

Comparaison des caractéristiques mécaniques



Les variables de commande

$$\Omega_r = \frac{v_{al} - \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) - (R_a + R_d) i_a}{K \Phi}$$

Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu

Action sur la tension d'alimentation

$$\Omega_r = \frac{\underline{v_{al}} - \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) - (R_a + R_d) i_a}{K \Phi}$$

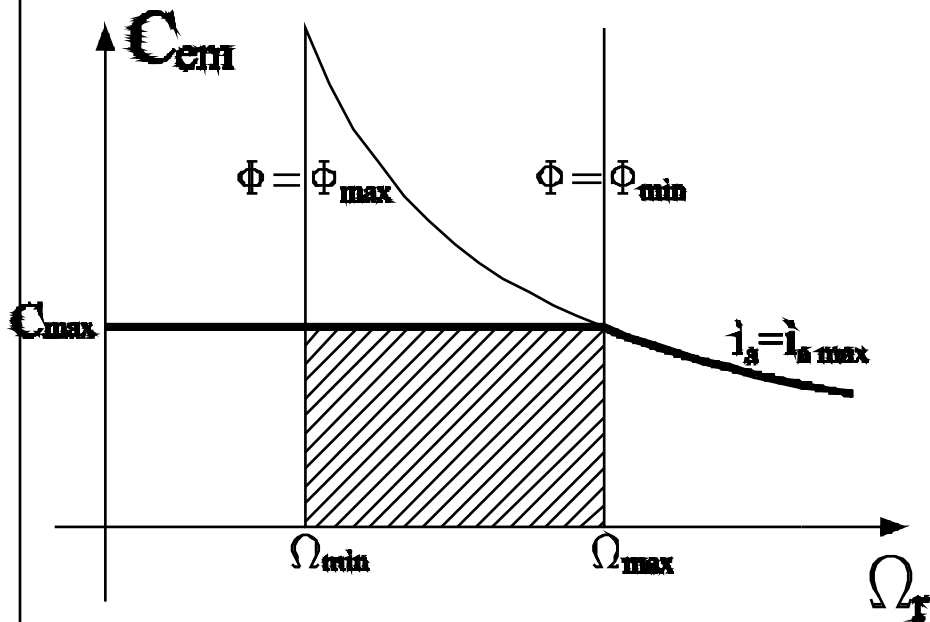
La vitesse se règle de 0 à sa valeur nominale par
action sur v_{al}

et, éventuellement, au-delà par action sur le courant
d'excitation

Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu

Action sur le courant d'excitation

$$\Omega_r = \frac{v_{al} - \Delta V_b \operatorname{sign}(i_a) - (R_a + R_d) i_a}{K \Phi}$$



$$v_{al} \approx e = K \Phi \Omega_r \text{ donc } \Phi_{min} = \frac{v_{al}}{K \Omega_{max}}$$

$$\text{et } C_{max} = K \Phi_{min} i_{a\ max} \approx \frac{v_{al} i_{a\ max}}{\Omega_{max}}$$

Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu

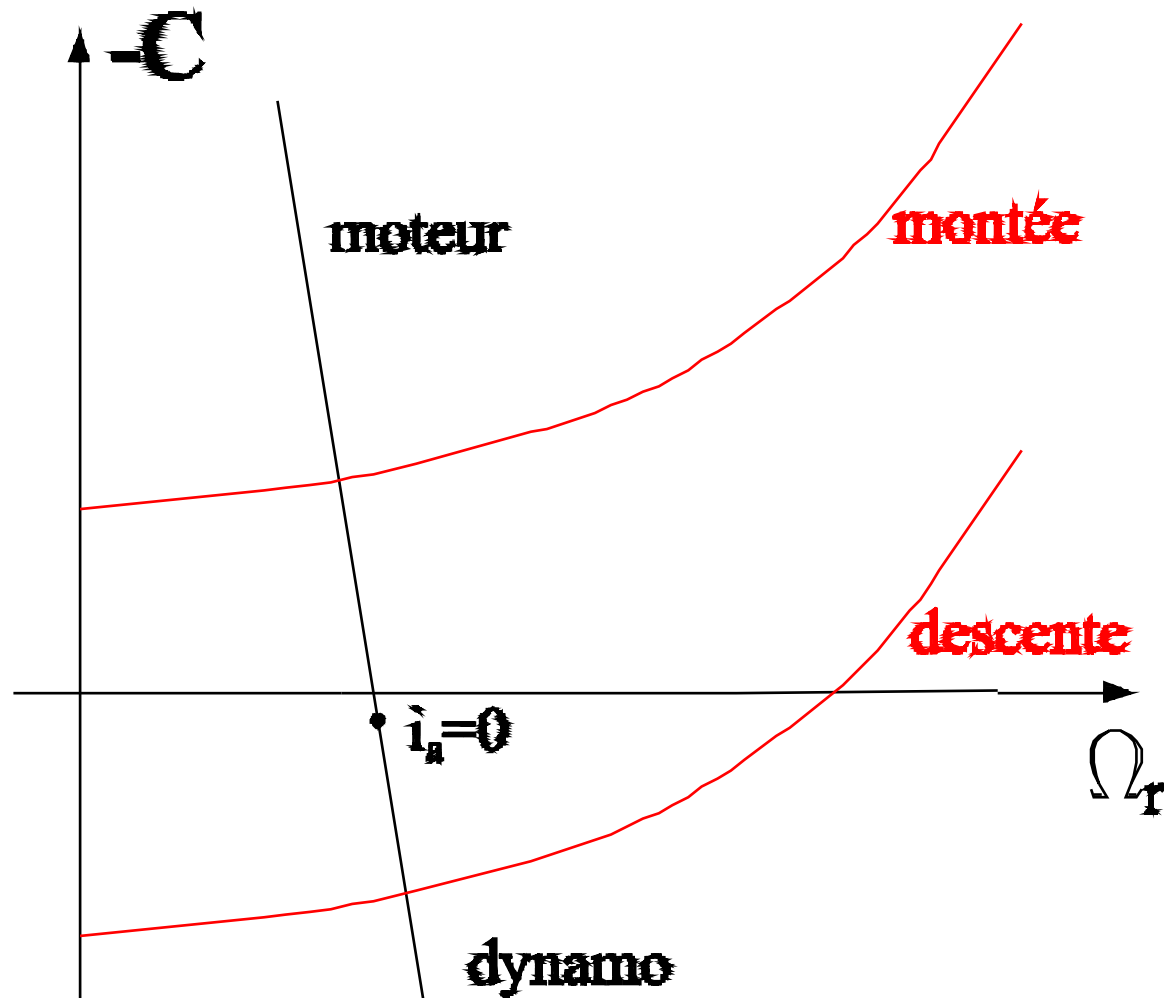
Comparaison

Comparé au réglage par le courant d'excitation, le réglage par la tension d'alimentation présente les caractéristiques suivantes :

- * coût plus élevé (pq?)*
- * rapidité plus grande (pq?)*
- * plage de réglage plus importante (pq?)*

Réglage de la vitesse des moteurs à courant continu

Freinage avec récupération d'énergie



Caractéristiques de freinage des moteurs à courant continu

Constitution

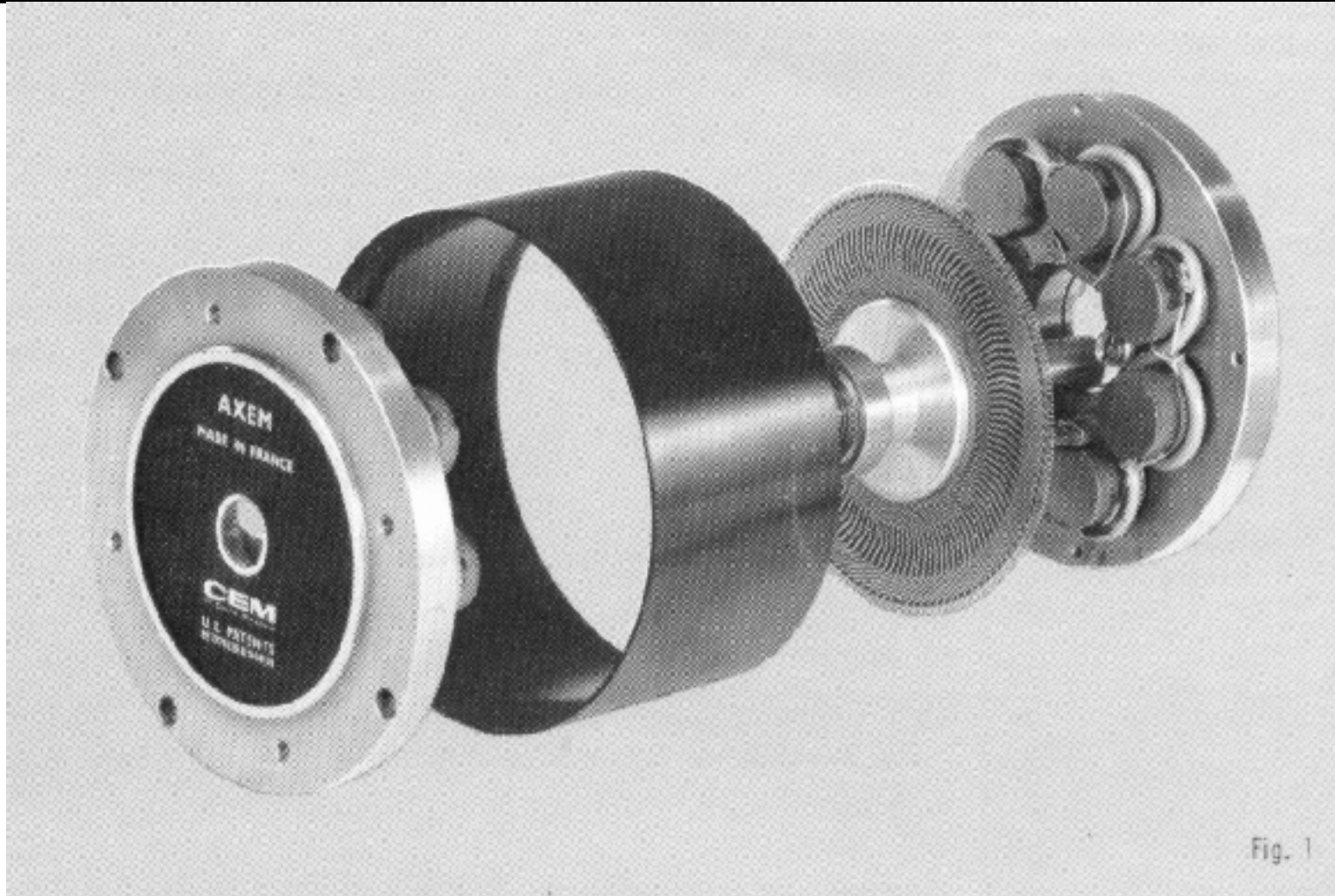
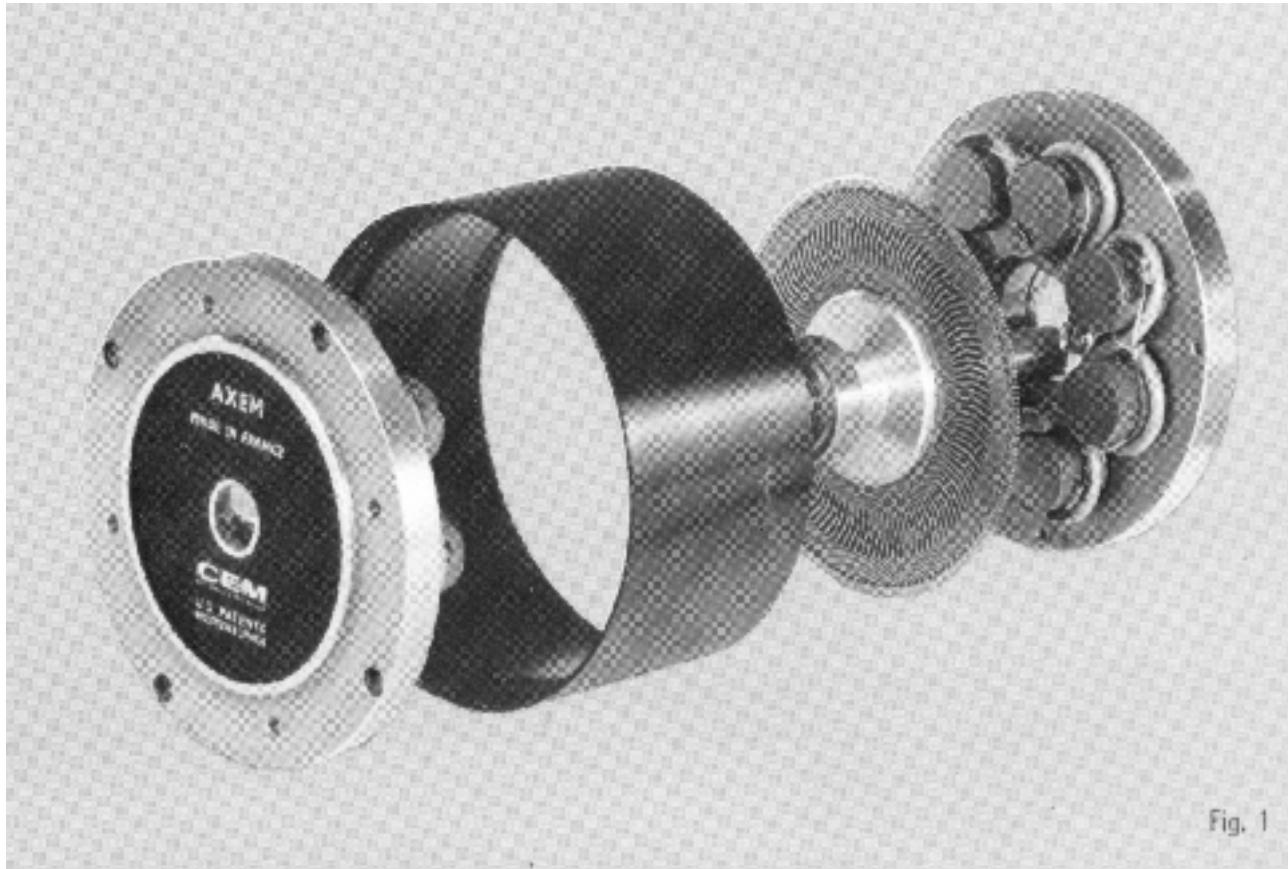


Fig. 1

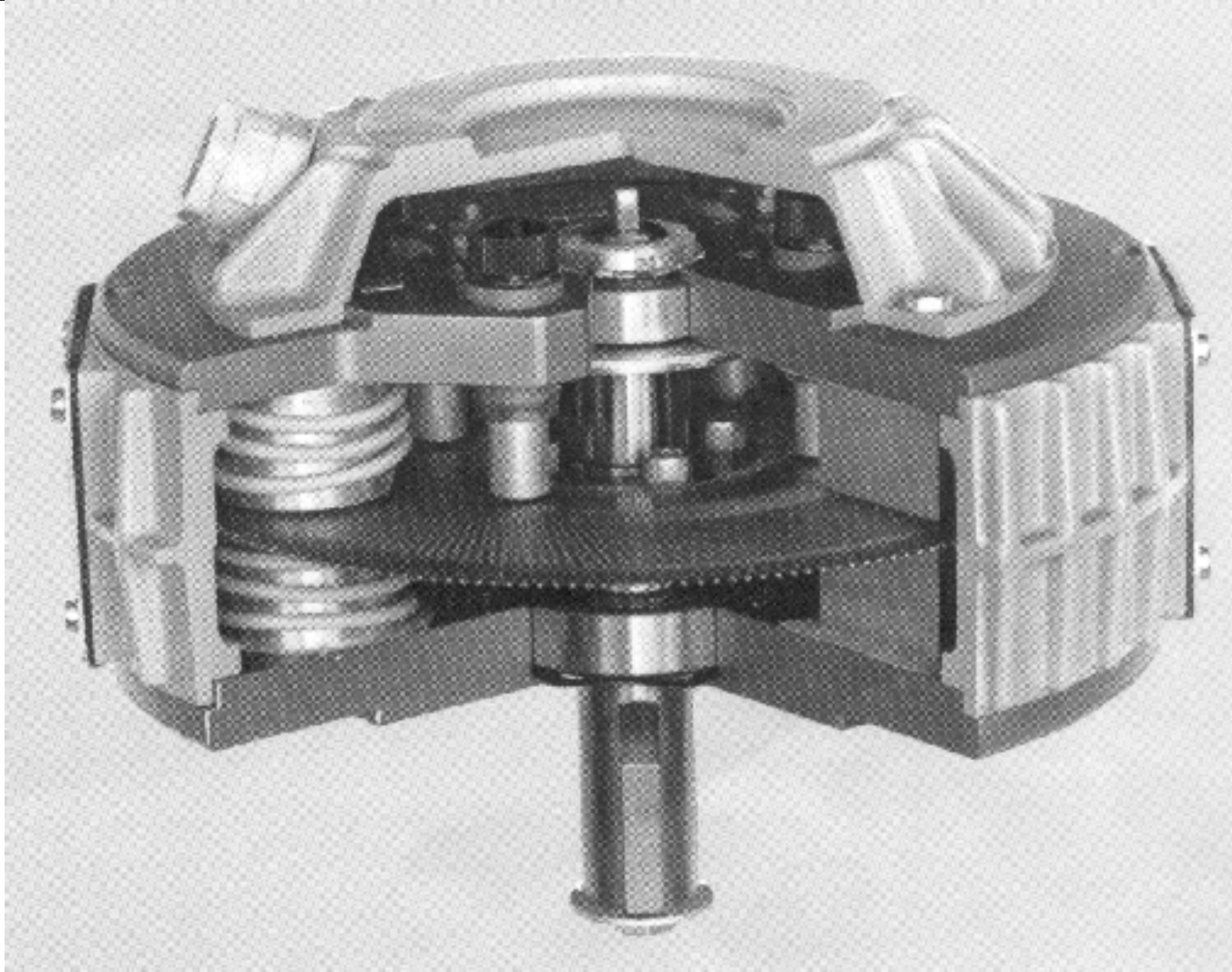
LES MOTEURS A ENTREFER AXIAL

Avantages



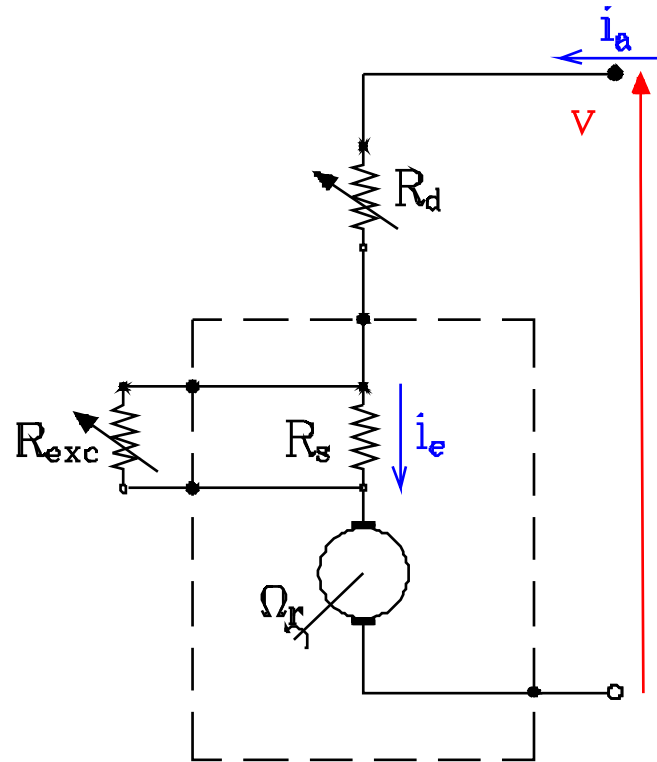
- * grande puissance massique : les densités de courant peuvent être multipliées par **10** **LES MOTEURS A ENTREFER AXIAL**
- * faible inertie du rotor : moment d'inertie divisée par **5 à 10**
- * adaptation aux basses tensions par suite du faible nombre de conducteurs
- * faible chute de tension aux balais - bonne commutation sans pôles auxiliaires : pas de fer dans l'induit - nombre élevé de lames de collecteur

Constitution



LES MOTEURS A ENTREFER AXIAL

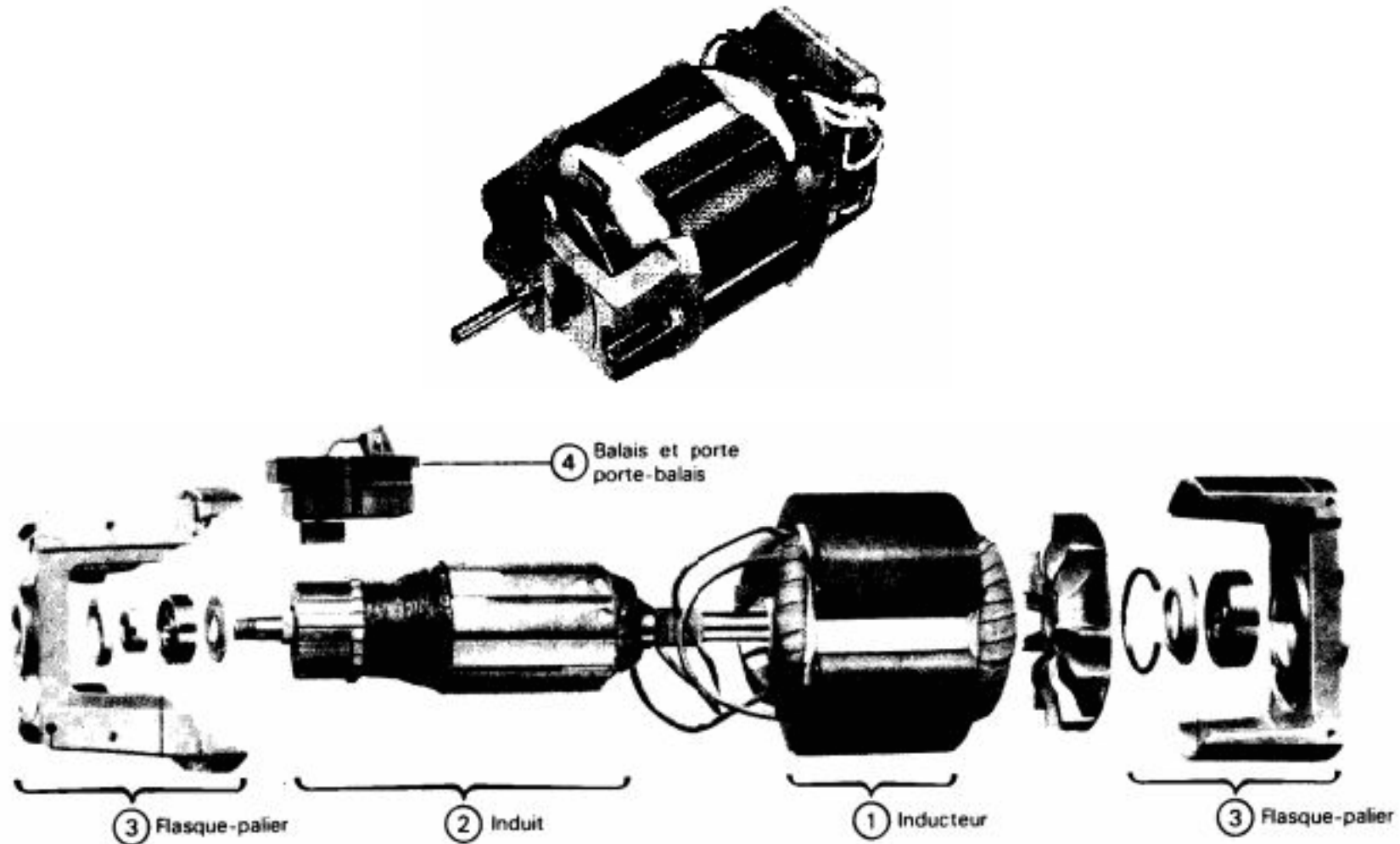
Fonctionnement en courant alternatif



$$\underline{V}_{al} = \underline{E} + (R_a + R_s + j\omega L_a) \underline{I}_a \text{ avec } \underline{E} = G \Omega_r \underline{I}_a$$

LES MOTEURS SERIE UNIVERSELS

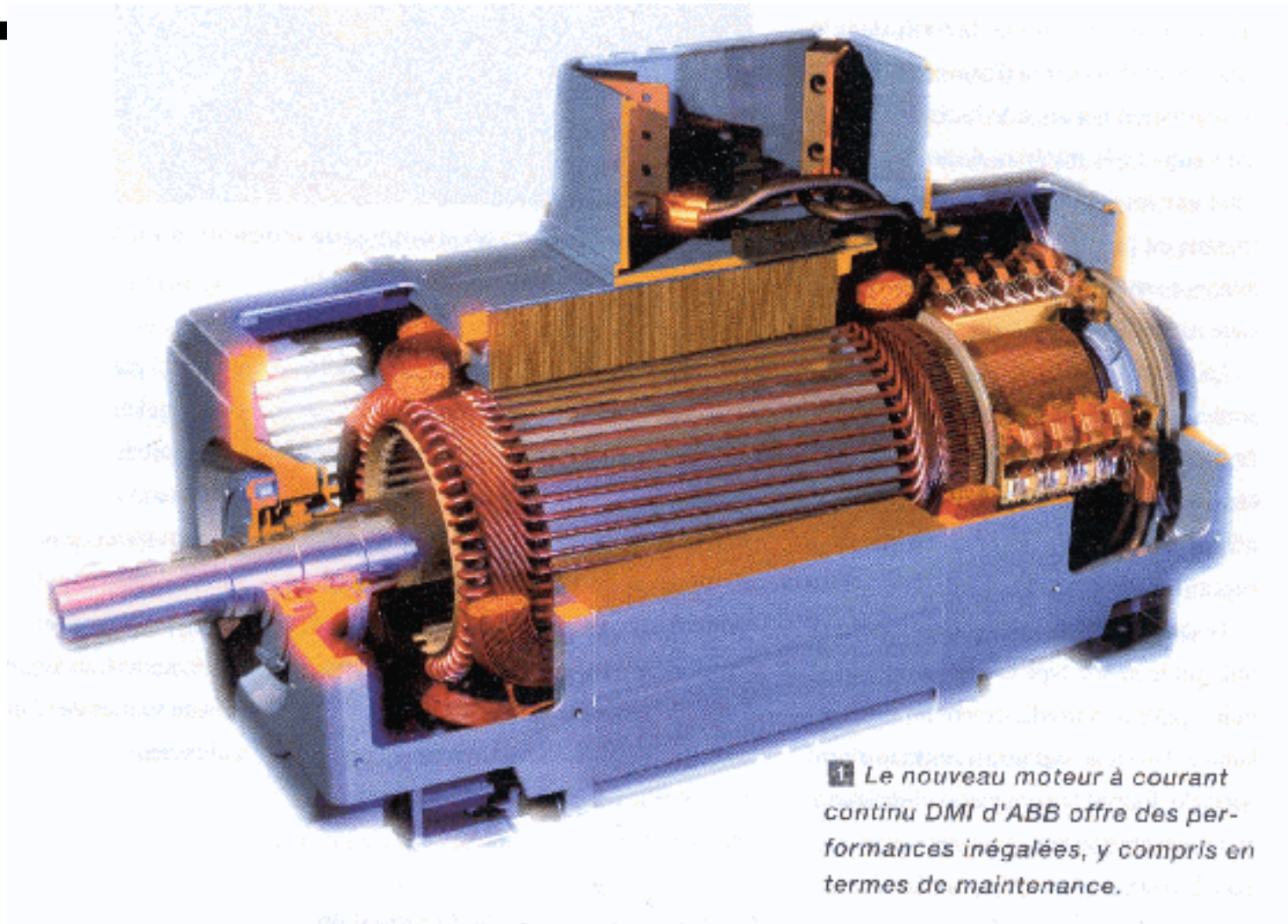
Moteur série universel



Chapitre 4 : LA MACHINE A COURANT CONTINU

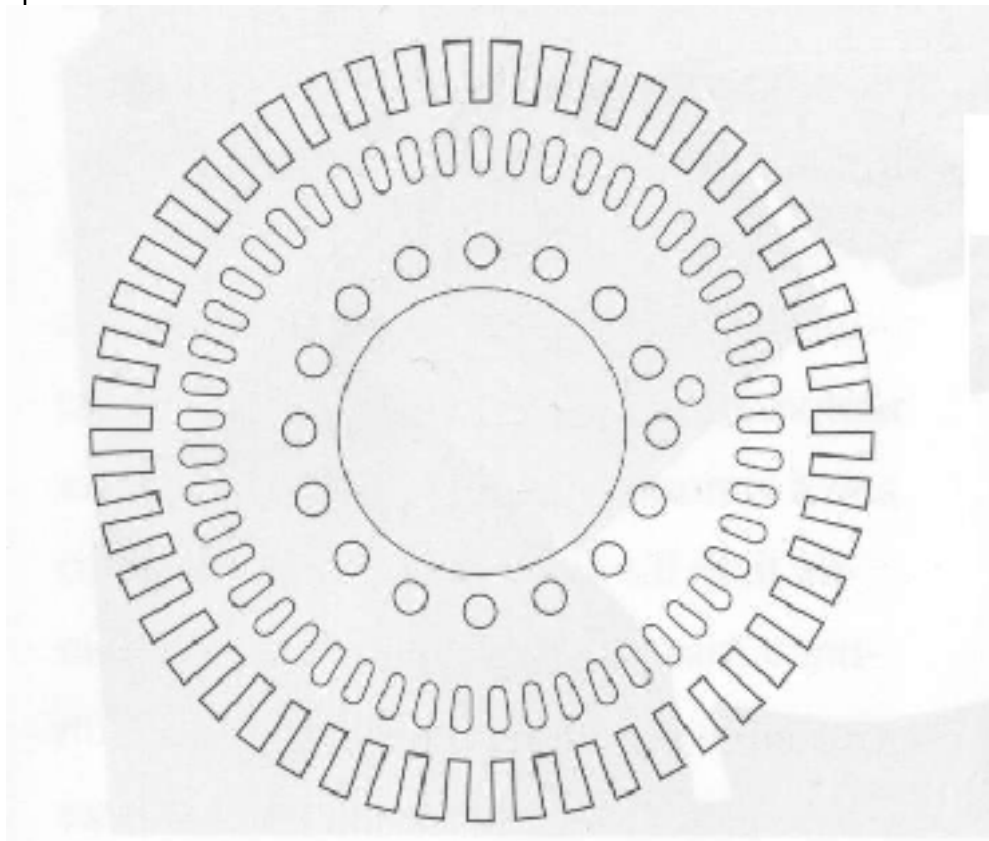
**Un moteur à courant continu moderne :
le type DMI de ABB : 350 kW-3300 tr/min**

Le moteur DMI de ABB



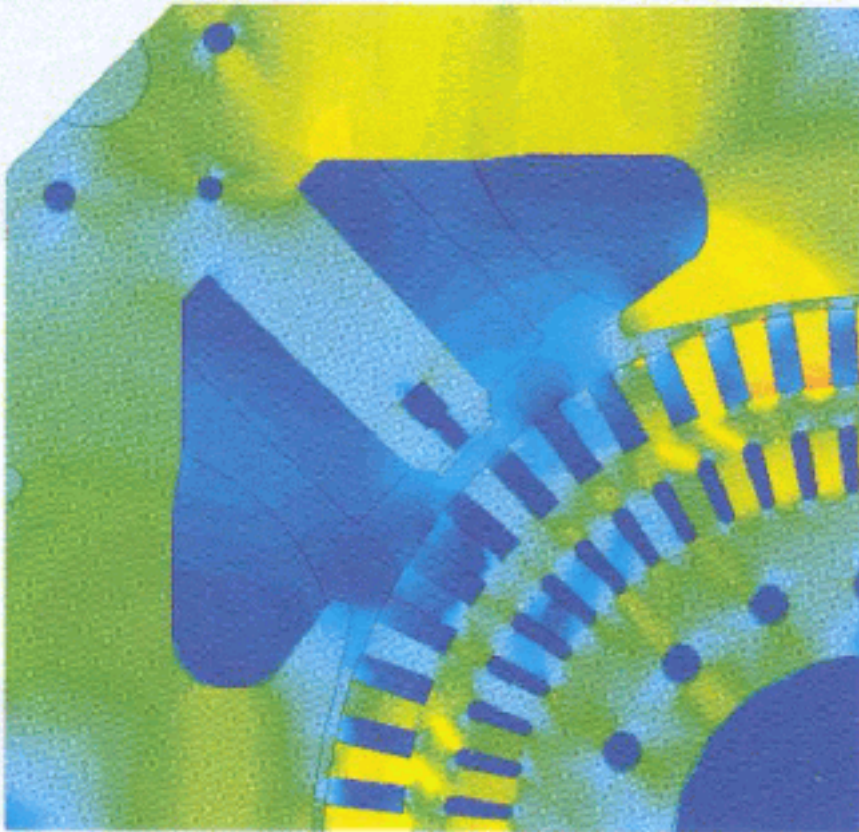
© Revue ABB 1/2000

Le moteur DMI de ABB

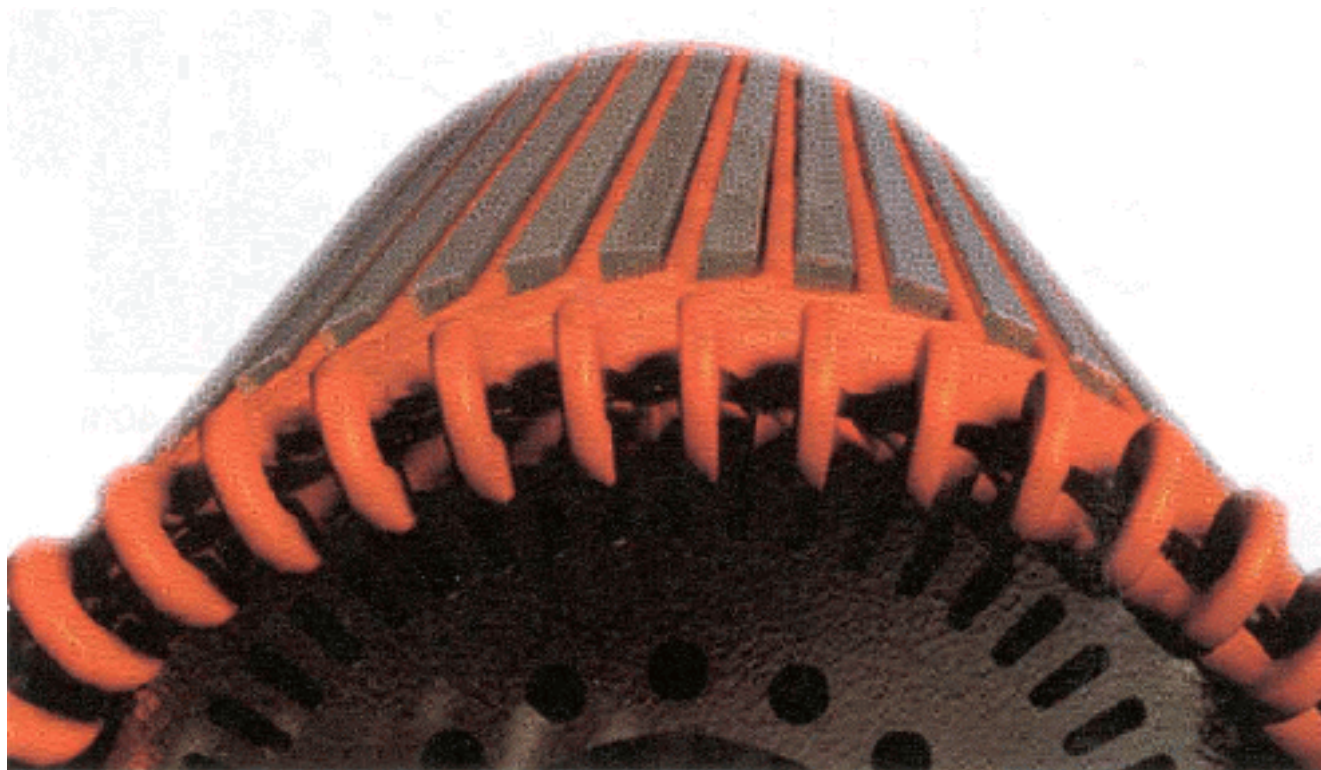


Tôles d'induit du nouveau moteur DMI. Des canaux de refroidissement plus larges, qui se prolongent jusqu'aux encoches et sont symétriques à celles-ci, améliorent le refroidissement et l'équilibre magnétique.

Le moteur DMI de ABB

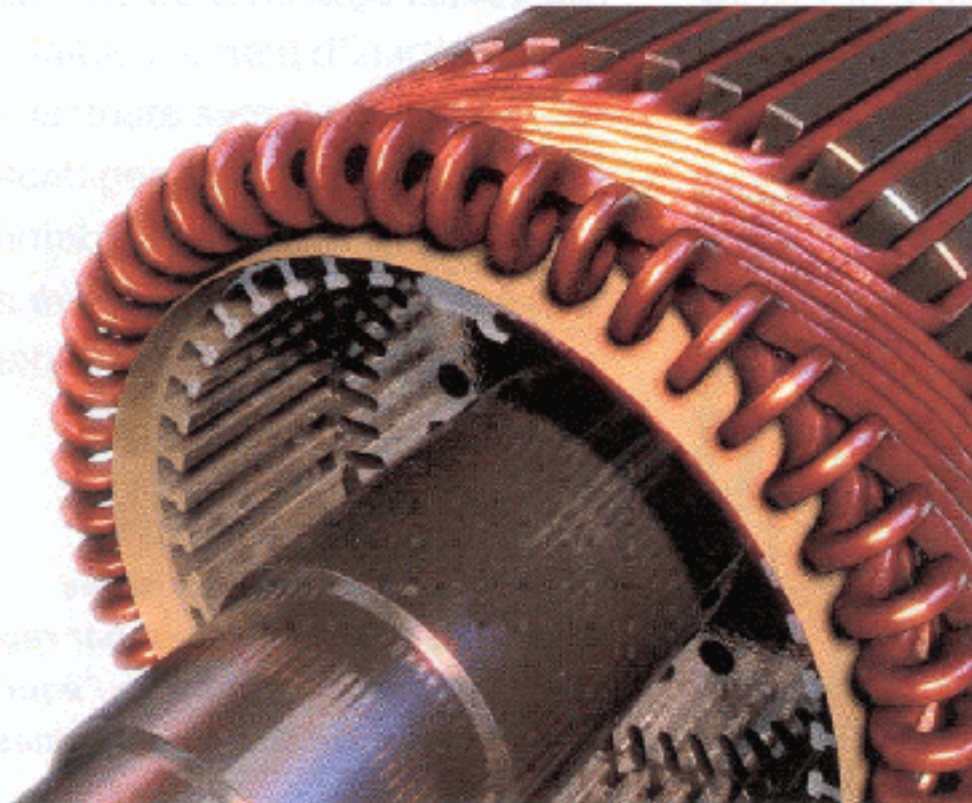


4 *Le montage symétrique des canaux de refroidissement par rapport aux encoches améliore l'équilibre magnétique entre les bobines d'induit.*

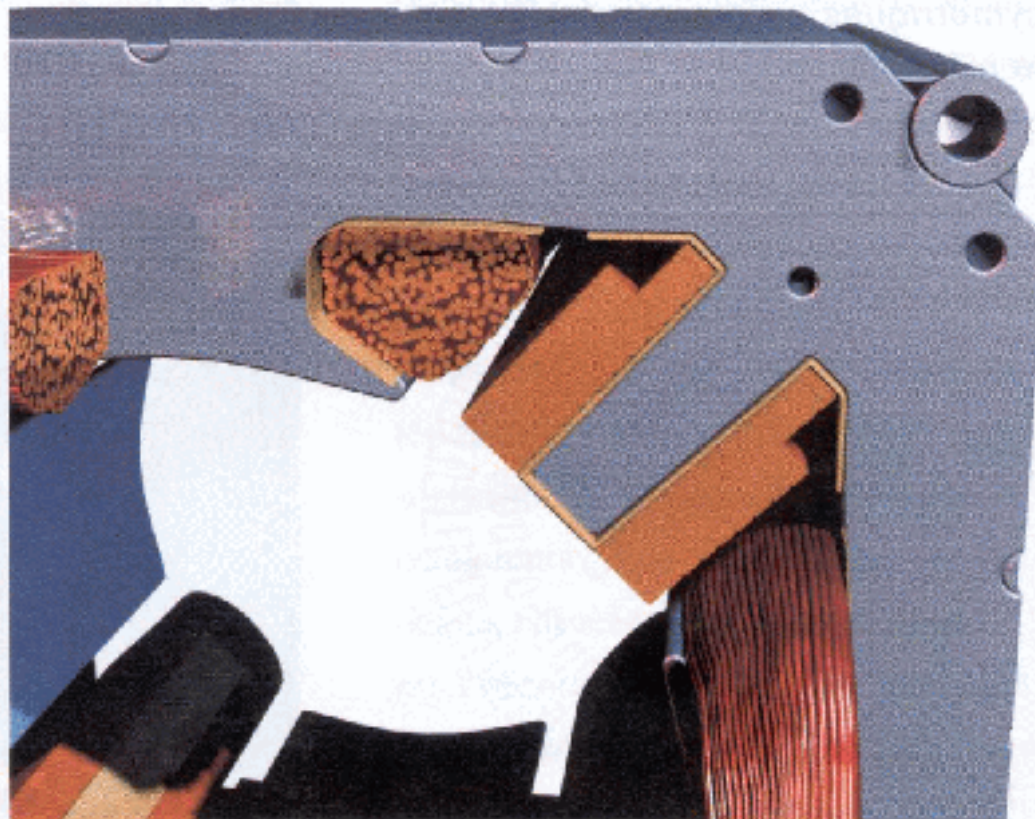


5 *Les bobines d'induit sont inclinées pour un meilleur fonctionnement à basses vitesses et un niveau de bruit inférieur.*

6 Les extrémités des bobines d'induit sont montées sur des bagues de fixation rigides en aluminium. Ce type de montage contribue à la vitesse maximale élevée du moteur DMI et améliore son refroidissement.



7 La forme du stator du moteur DMI a été nettement améliorée avec plus d'espace pour les enroulements, un meilleur équilibre magnétique et une meilleure répartition de la température.





8 Le diamètre du collecteur est plus petit, pour une vitesse périphérique réduite et un meilleur fonctionnement même à basses vitesses.