

**Polytech'Nice-Sophia**

# Machines Asynchrones



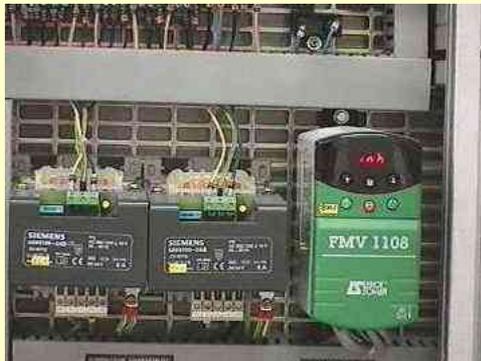
# ***GENERALITES***

Les machines asynchrones sont surtout utilisées comme moteurs. C 'est dans les éoliennes qu'elles sont utilisées en génératrice hypersynchrone.

70 à 80% des moteurs électriques sont des moteurs asynchrones

Leur gamme de puissance s'étale de quelques watts à une dizaine de mégawatts.

- Moteurs directement sur un réseau
- association avec un variateur de vitesse (Redresseur +onduleur)



## *Avantages et inconvénients*

### Avantages :

- Démarrage direct sur un réseau triphasé
- pas de problèmes d'accrochages comme les MS
- coûts de fabrication et de maintenance faibles
- pilotage en vitesse variable par des variateurs de vitesse industriels (technologie éprouvée et relativement peu chère).

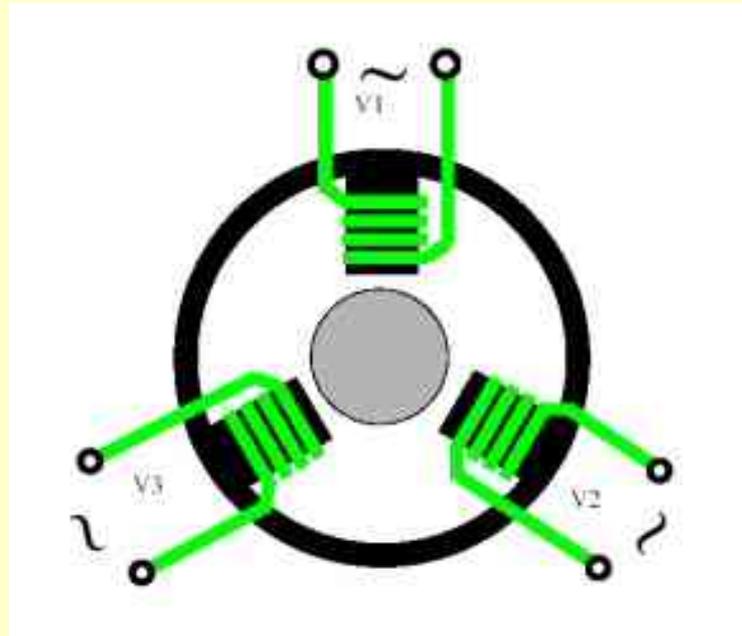
### Inconvénients

- mauvais rendement (pertes au rotor)
- mauvais facteur de puissance : comportement inductif

## Machine en concurrence avec:

- Machine à courant continu et machine synchrone à aimants permanents pour les commandes performantes...faible et moyenne puissances
- Machine synchrone à rotor bobiné pour les fortes puissances (>MW)

# *Schéma de principe*



***Le terme de machine asynchrone ou d'induction regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie (rotor) est différente de la vitesse de rotation du champ tournant généré par les bobinages statoriques.***

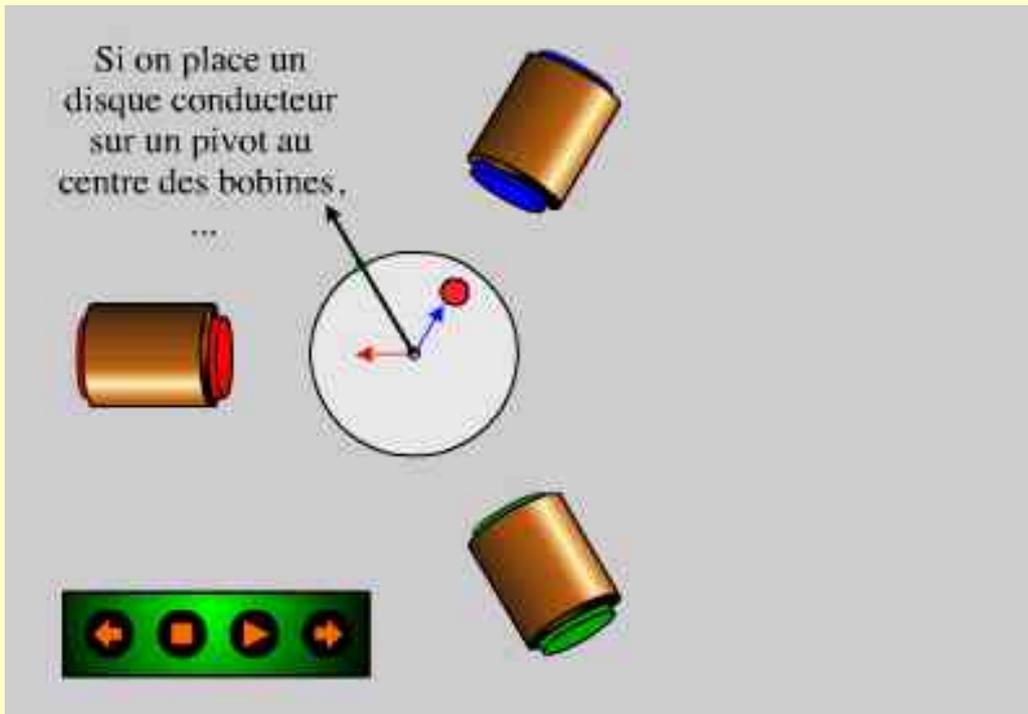
*RELATION ENTRE VITESSE ET NOMBRE DE PAIRES  
DE PÔLES*

Nombre de paires de pôles p	$f_s$ (Hz)	Ns (tr/min)
1	50	3000
2	50	1500
3	50	1000
4	50	750

# EXPERIENCE

**ACTION:**

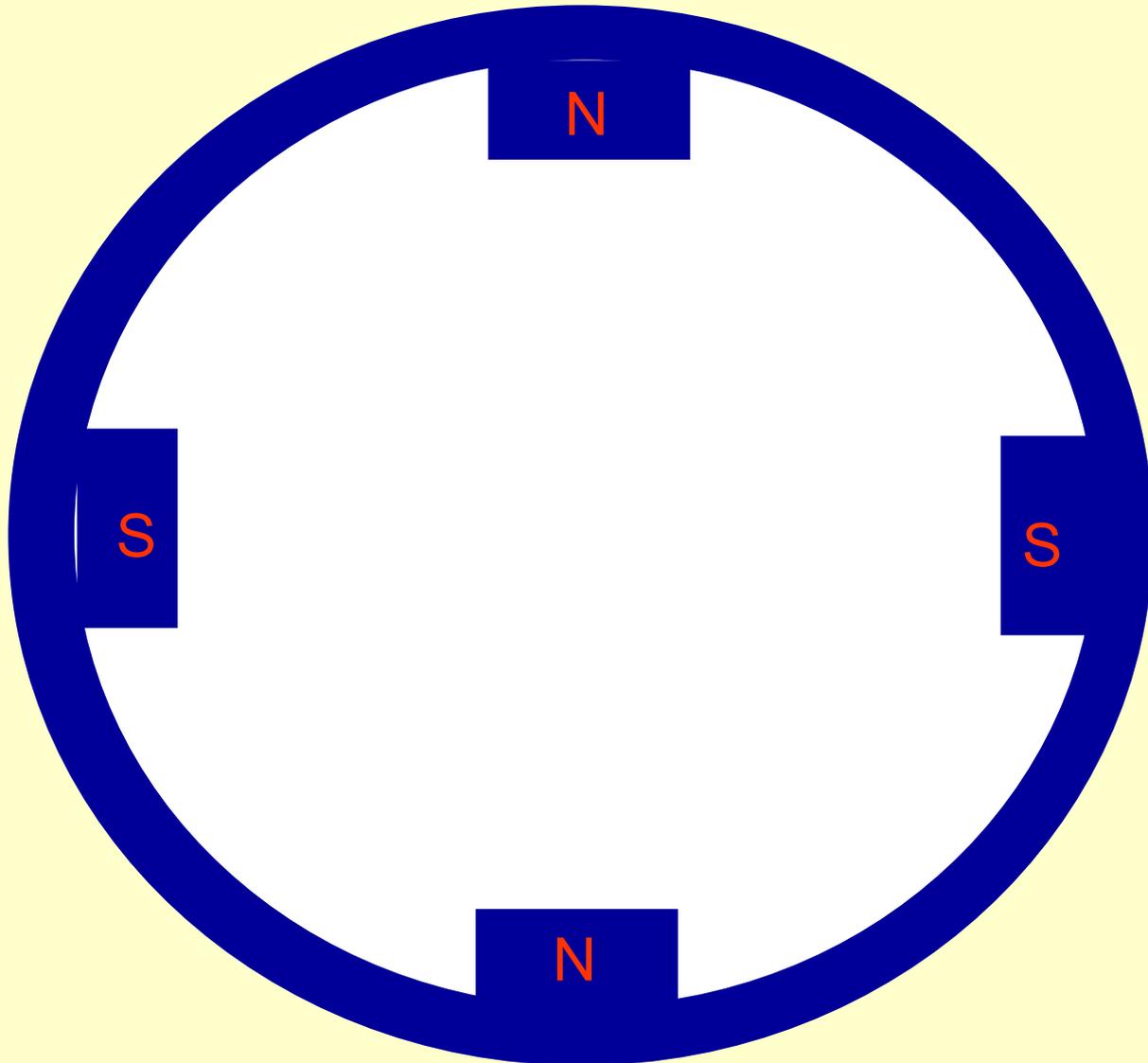
Champ tournant créé par le stator

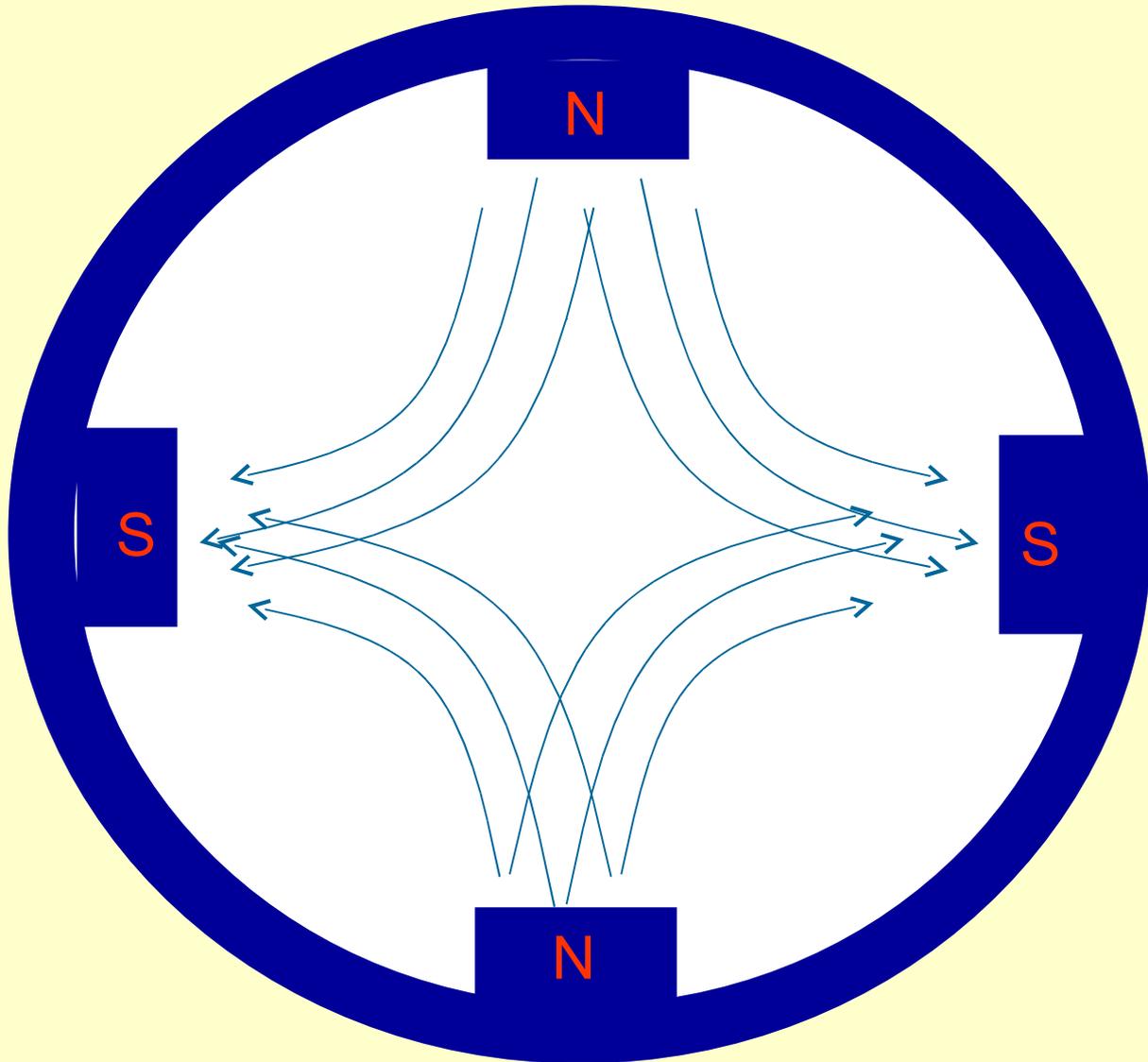


**REACTION:**

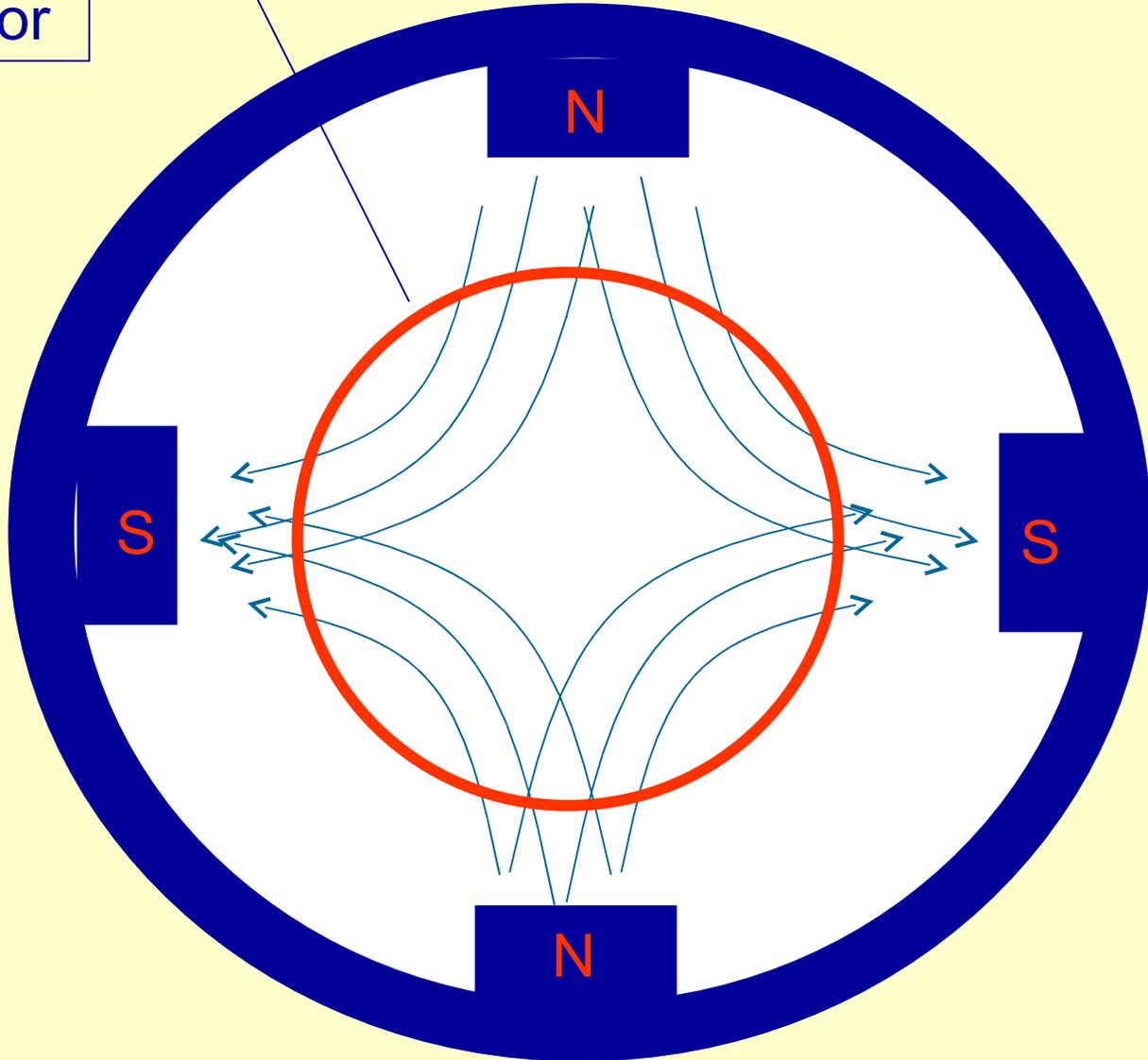
Création d'un champ tournant par le rotor et mise en rotation du rotor

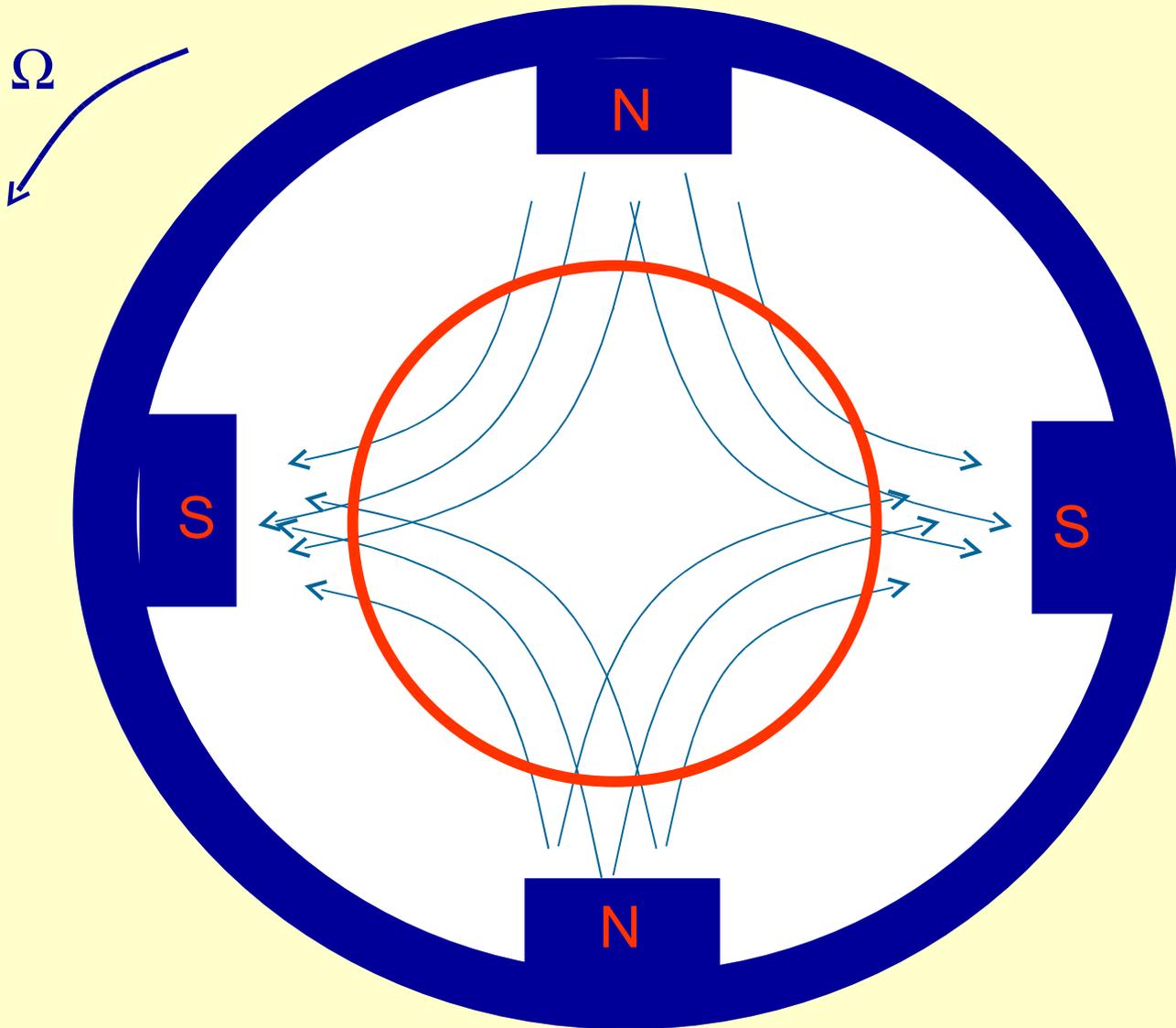
# Stator tétrapolaire par exemple

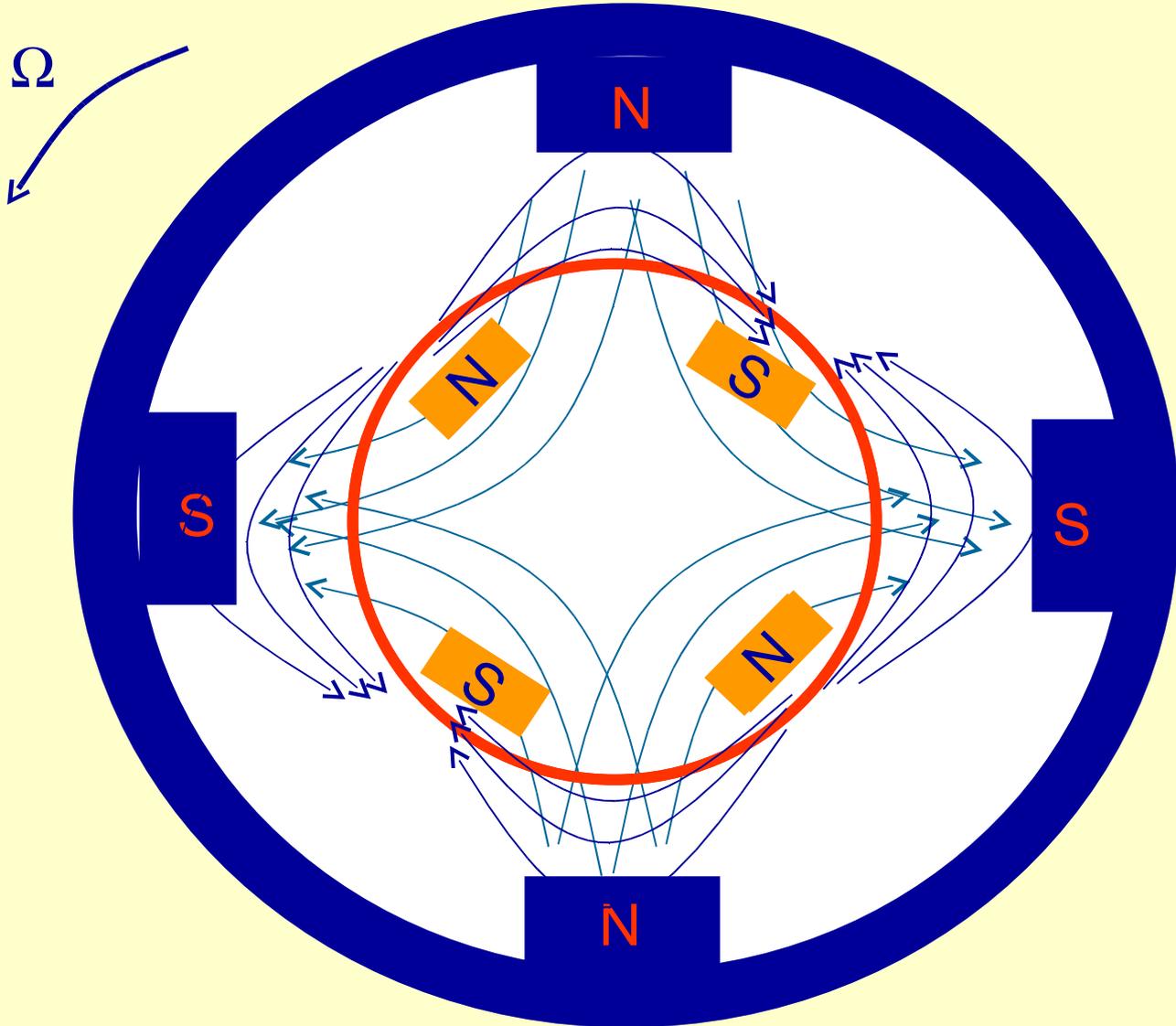


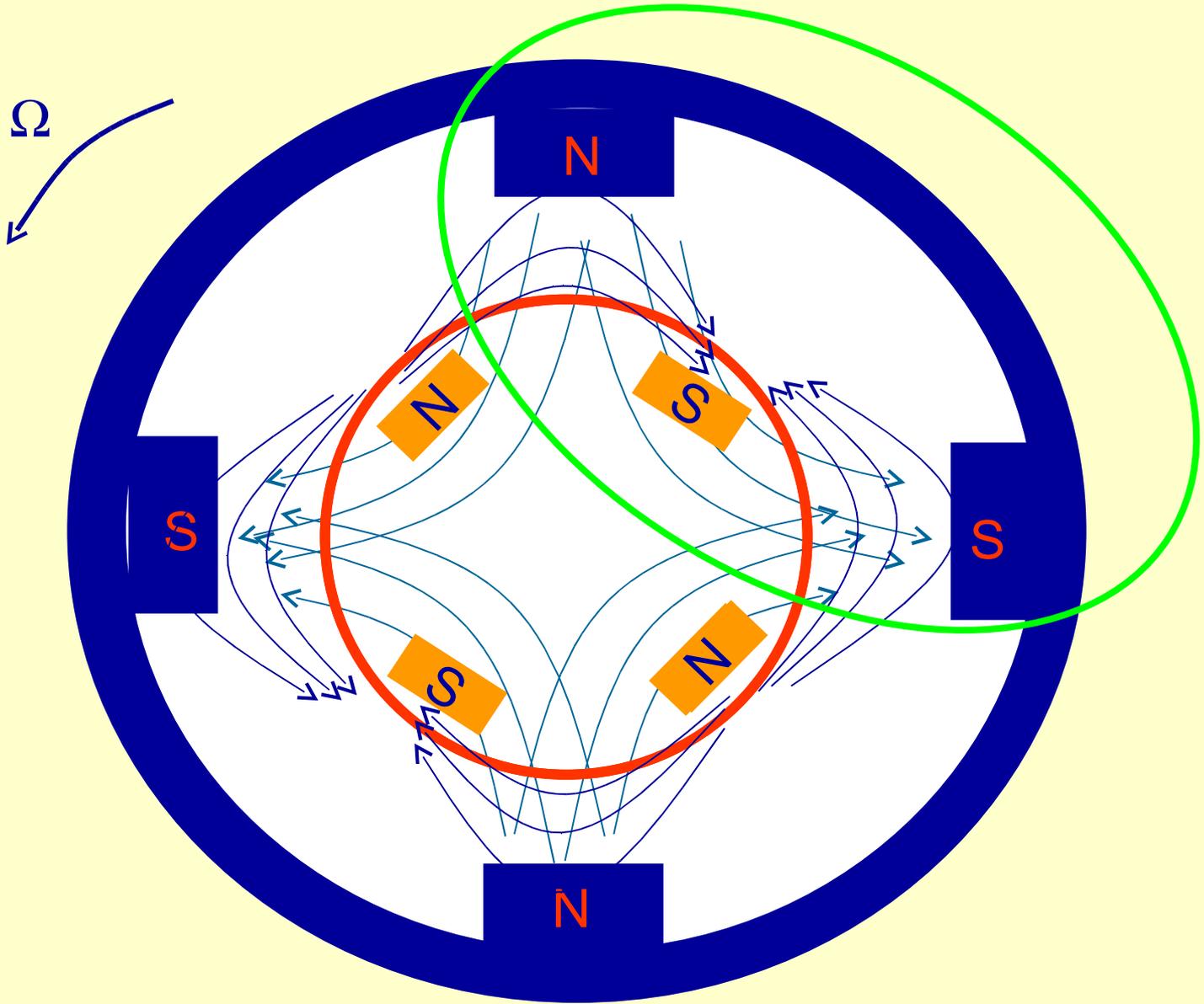


rotor

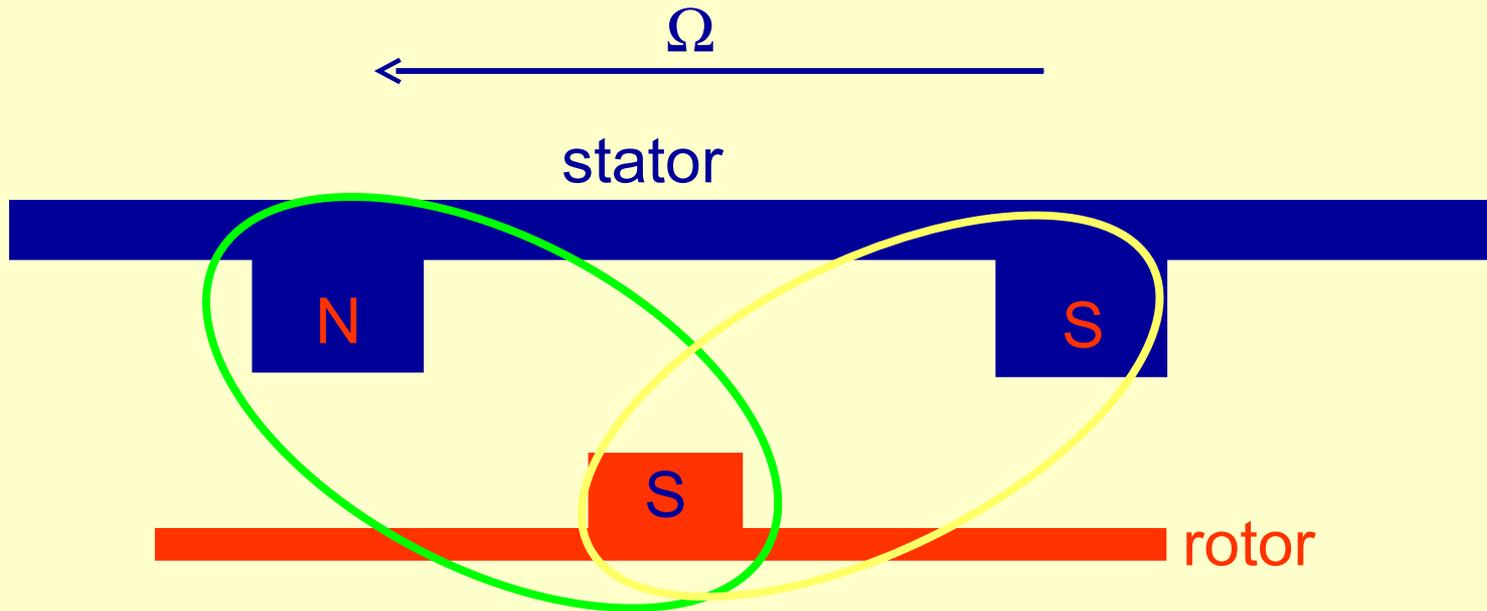








# Mise en rotation du rotor



Le pôle nord stator tire  
le pôle sud rotor

Le pôle sud stator repousse  
le pôle sud rotor

Sur la périphérie du rotor, il y a nécessairement autant de pôles que sur le stator; cela résulte de leur nature :  
**ce sont des pôles induits**

Les deux systèmes de pôles glissants, statoriques et rotoriques, tournent donc au synchronisme.

Les deux champs se composent pour former un champ magnétique glissant résultant, tournant à  $\Omega_s$ .

L'attraction/répulsion mutuelle entre pôles statoriques et rotoriques développe le couple moteur; ce couple est le **couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique résulte des courants induits, et donc des variations de flux.

Si le rotor tourne à la même vitesse que le stator, il n'y a plus de variation de flux.

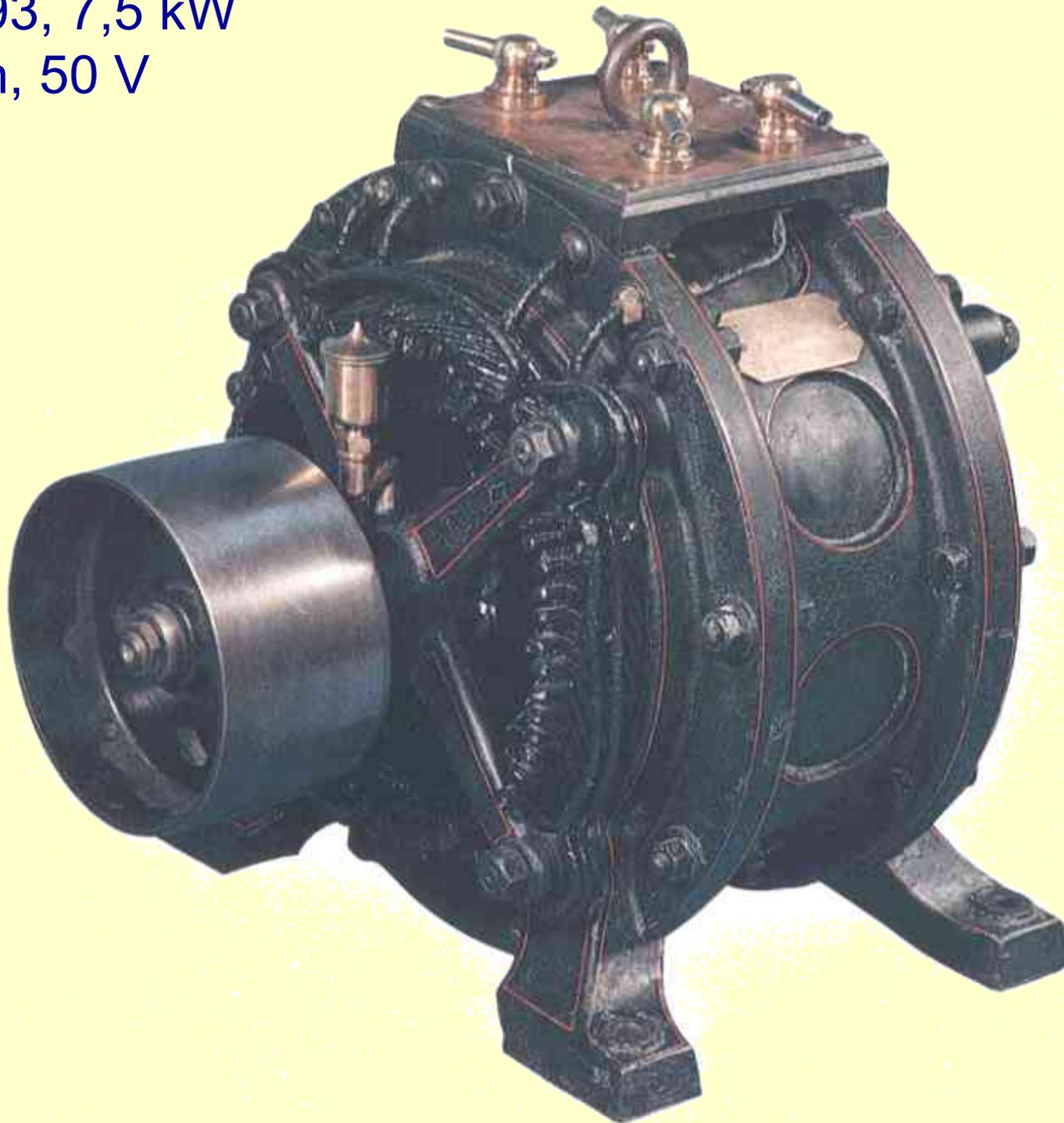
Donc le rotor ne peut tourner qu'à une vitesse inférieure à celle du champ statorique.

La vitesse de synchronisme ne peut en aucun cas être atteinte (en fonctionnement moteur). D'où le nom de machine **asynchrone**.

Le rotor tourne à une vitesse  $N_r < N_s$  inférieure à celle du champ statorique. Le rotor **glisse** donc par rapport à ses propres pôles. Ce **glissement** provoque une perte d'énergie qui lui est proportionnelle.

# *Historique*

Mat de 1893, 7,5 kW  
1700 tr/min, 50 V



Mat 0,75 kW

1933-1946

1946-1961

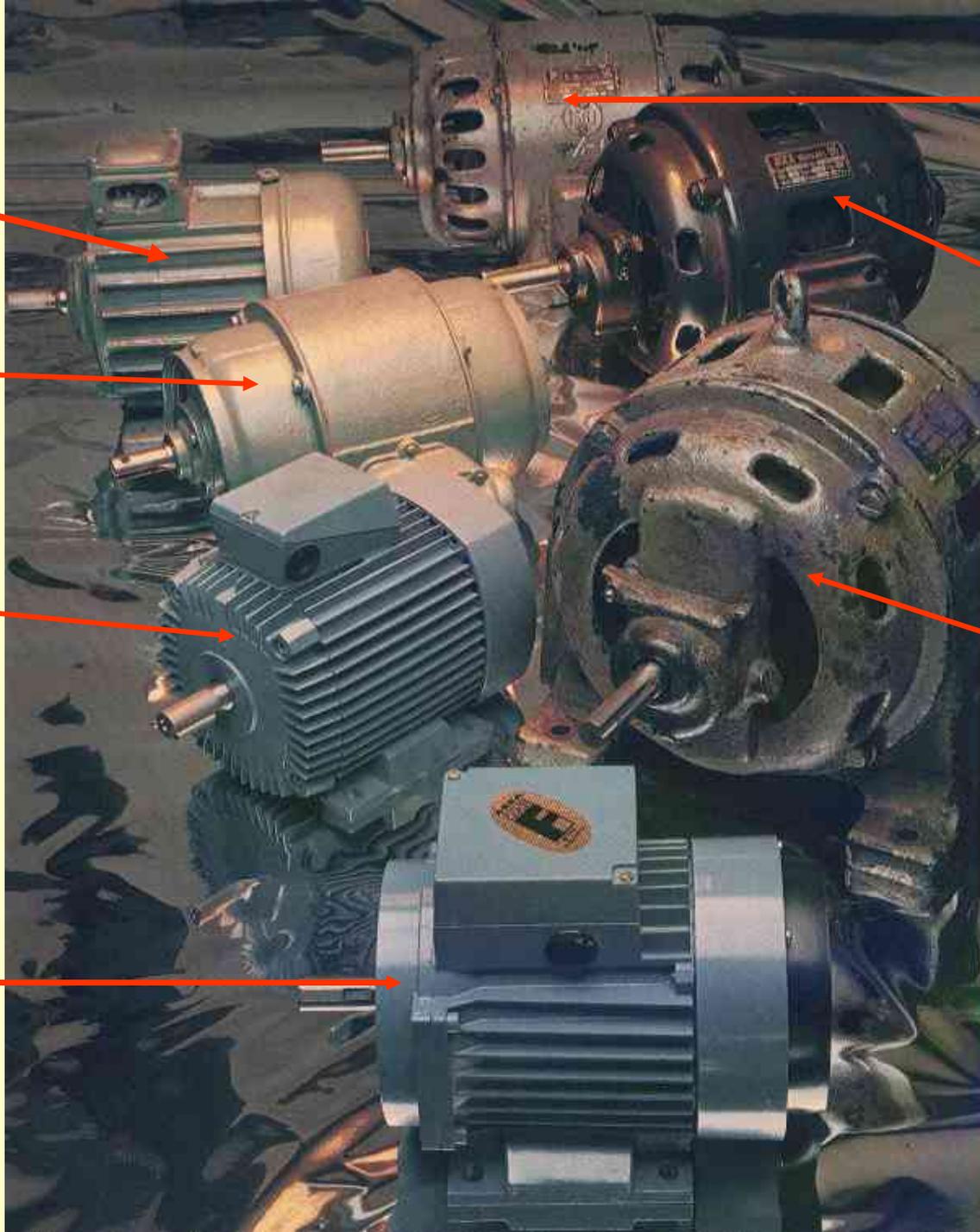
1961-1970

1970-...

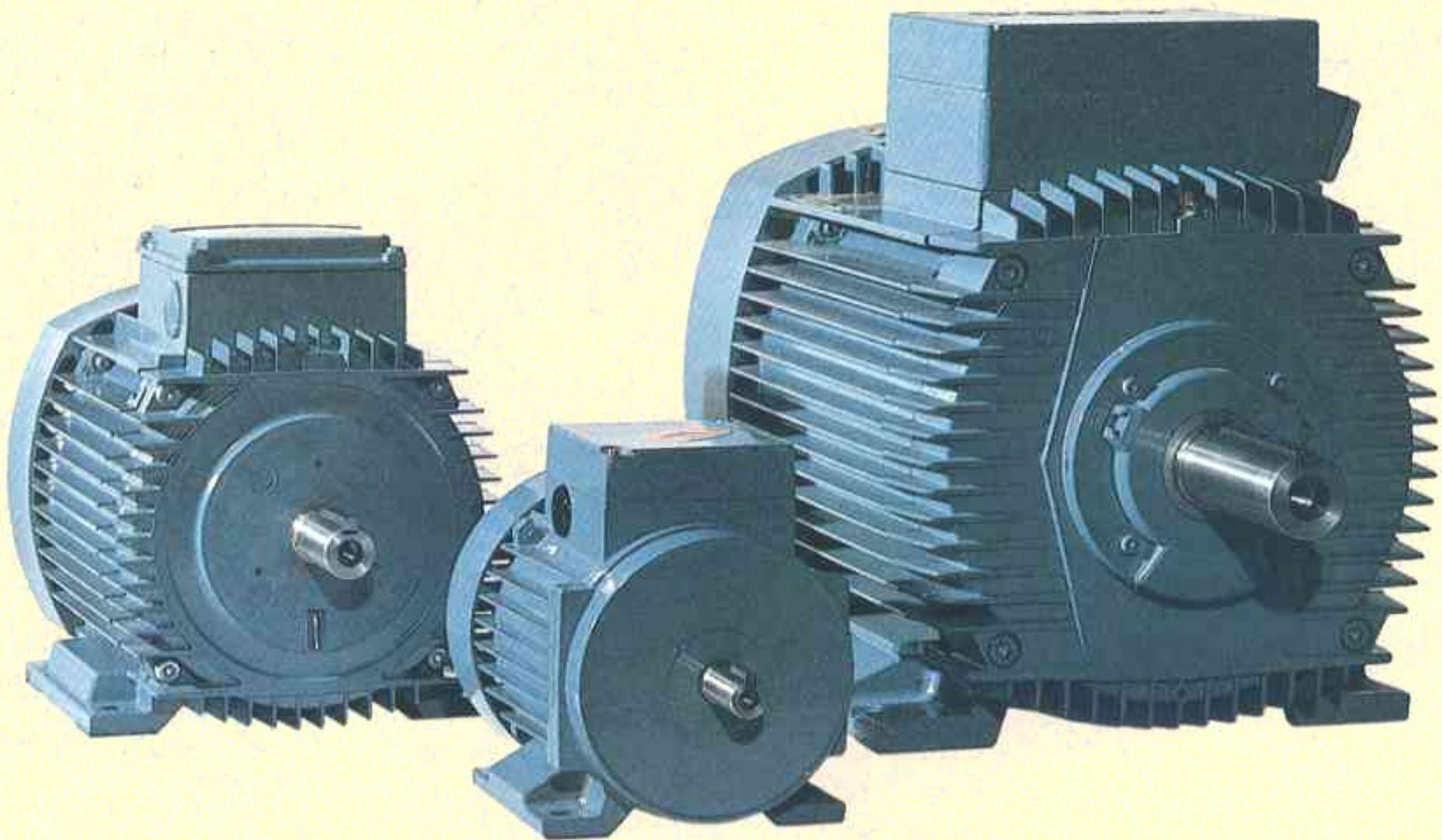
1922-1933

1912-1922

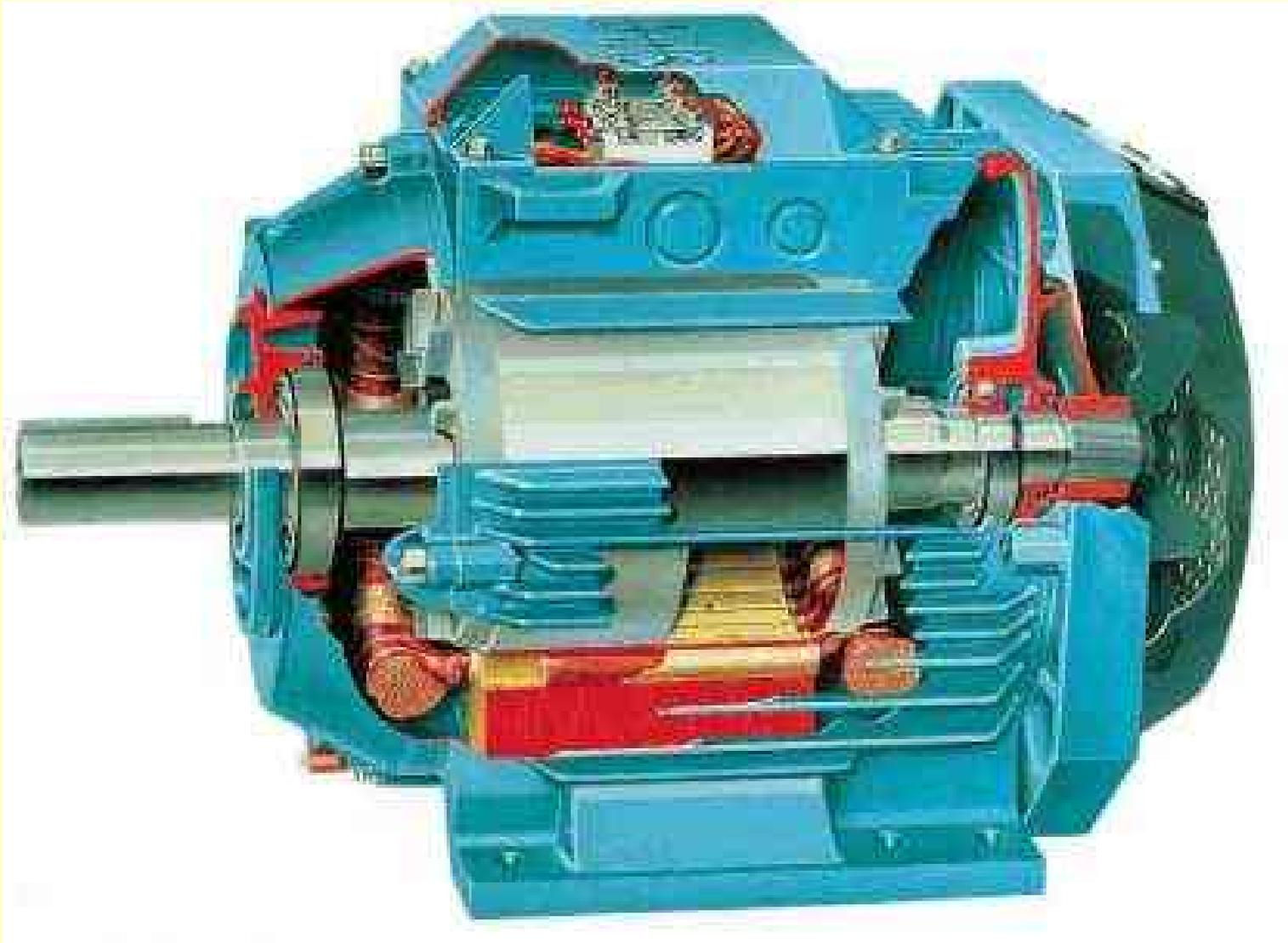
1905-1912



# ***TECHNOLOGIE***

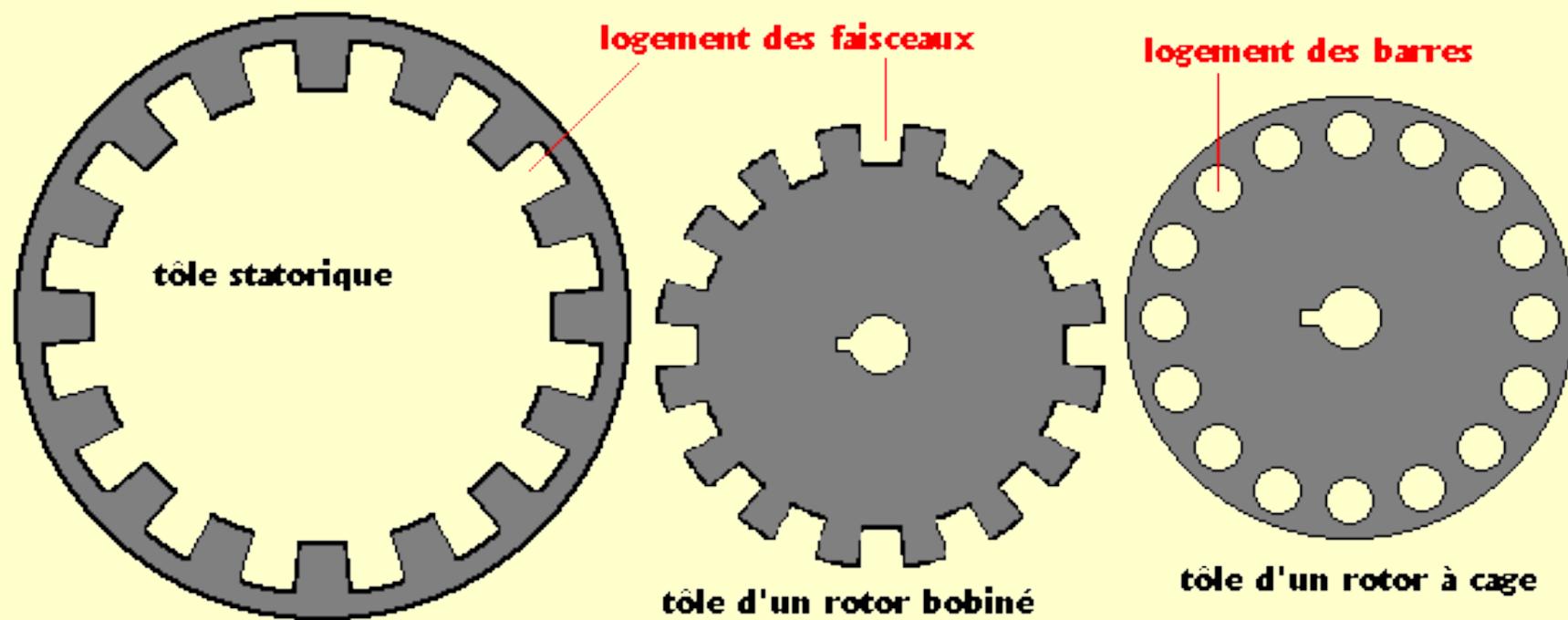


3 MAT de 0,18 kW à 45 kW

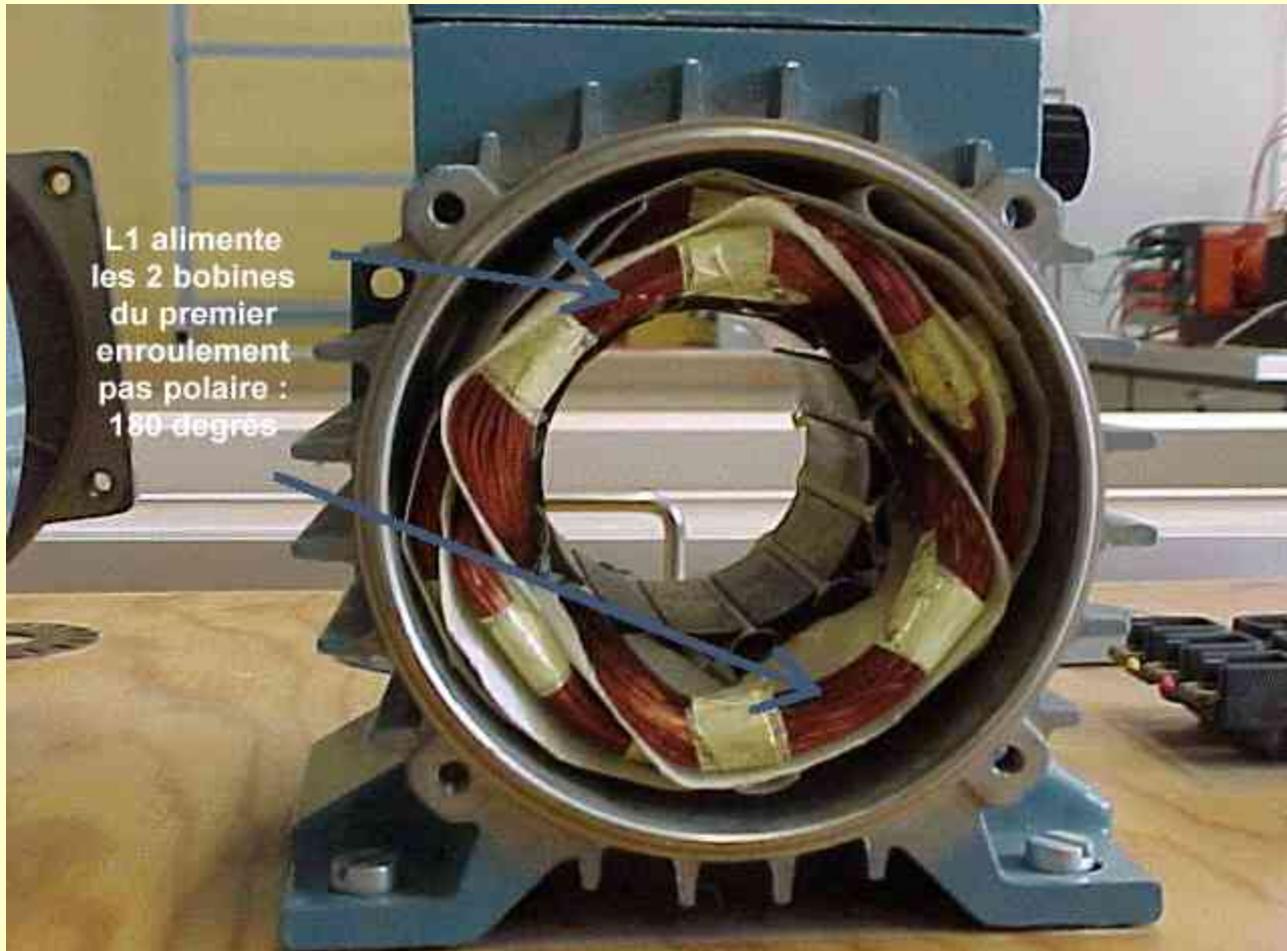


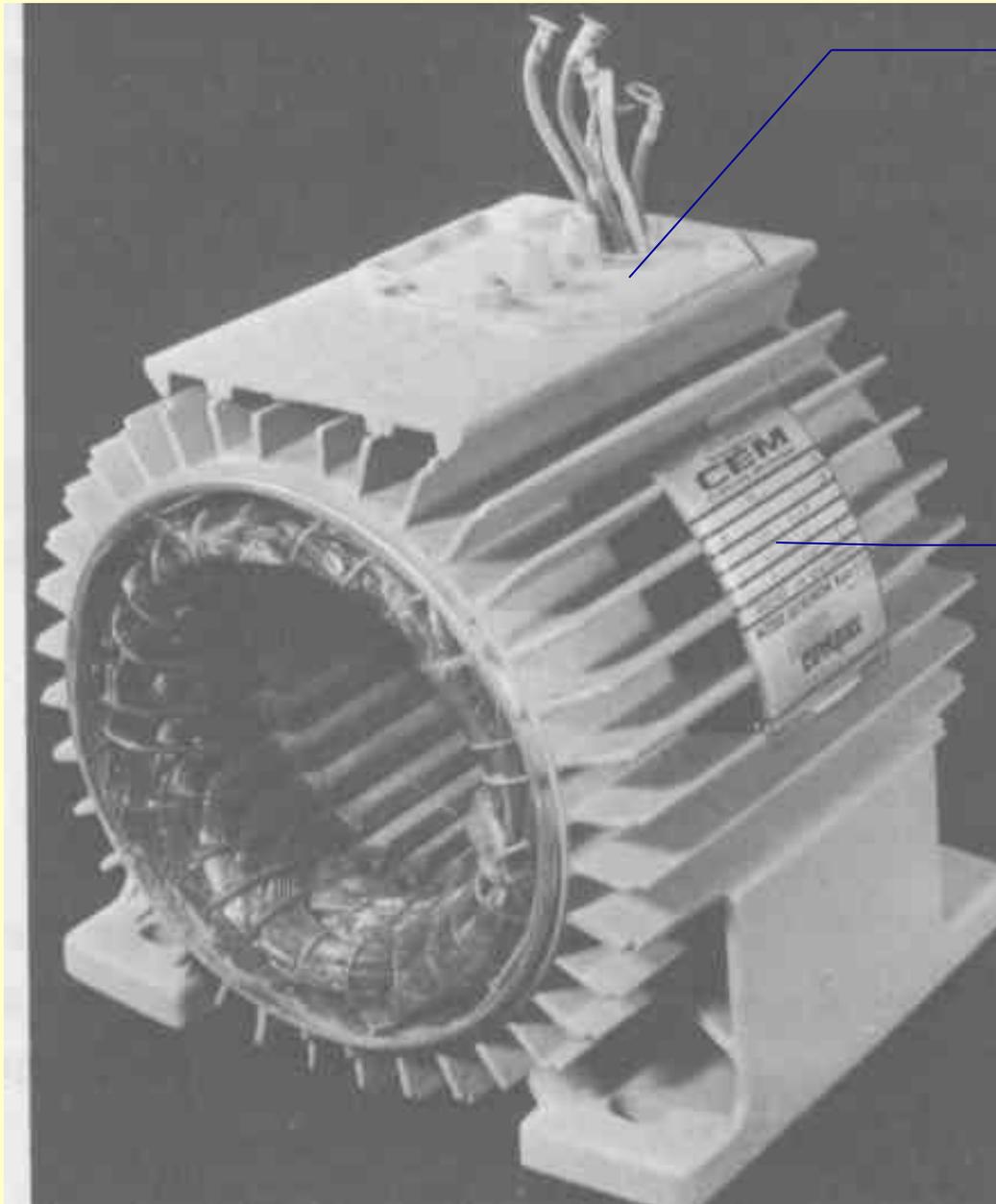
La machine asynchrone est constituée d'un stator semblable à celui d'une machine synchrone.

Ce stator, alimenté par des courants triphasés, produit un champ magnétique tournant (cf th de Ferraris).



# ***Le stator***

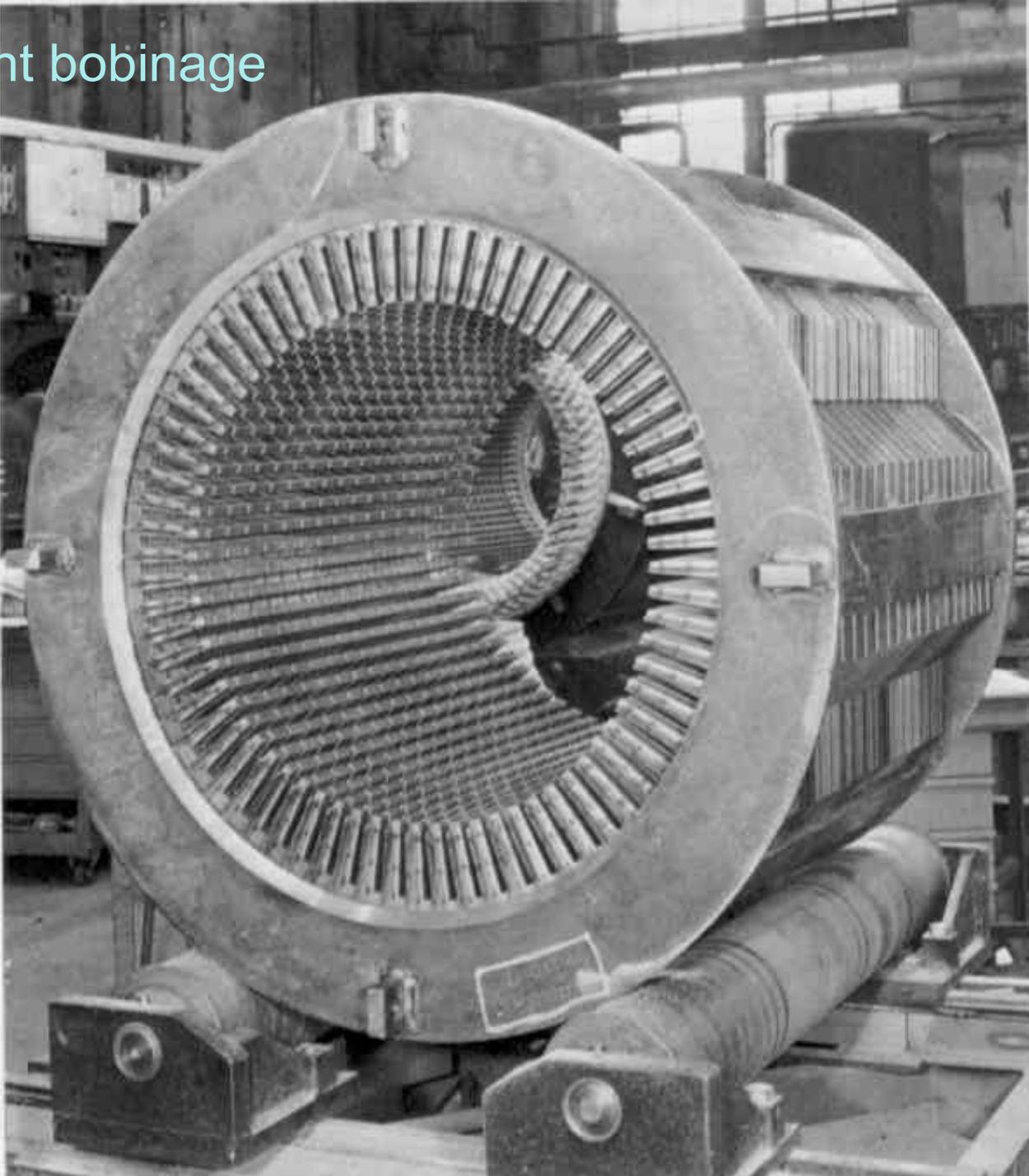




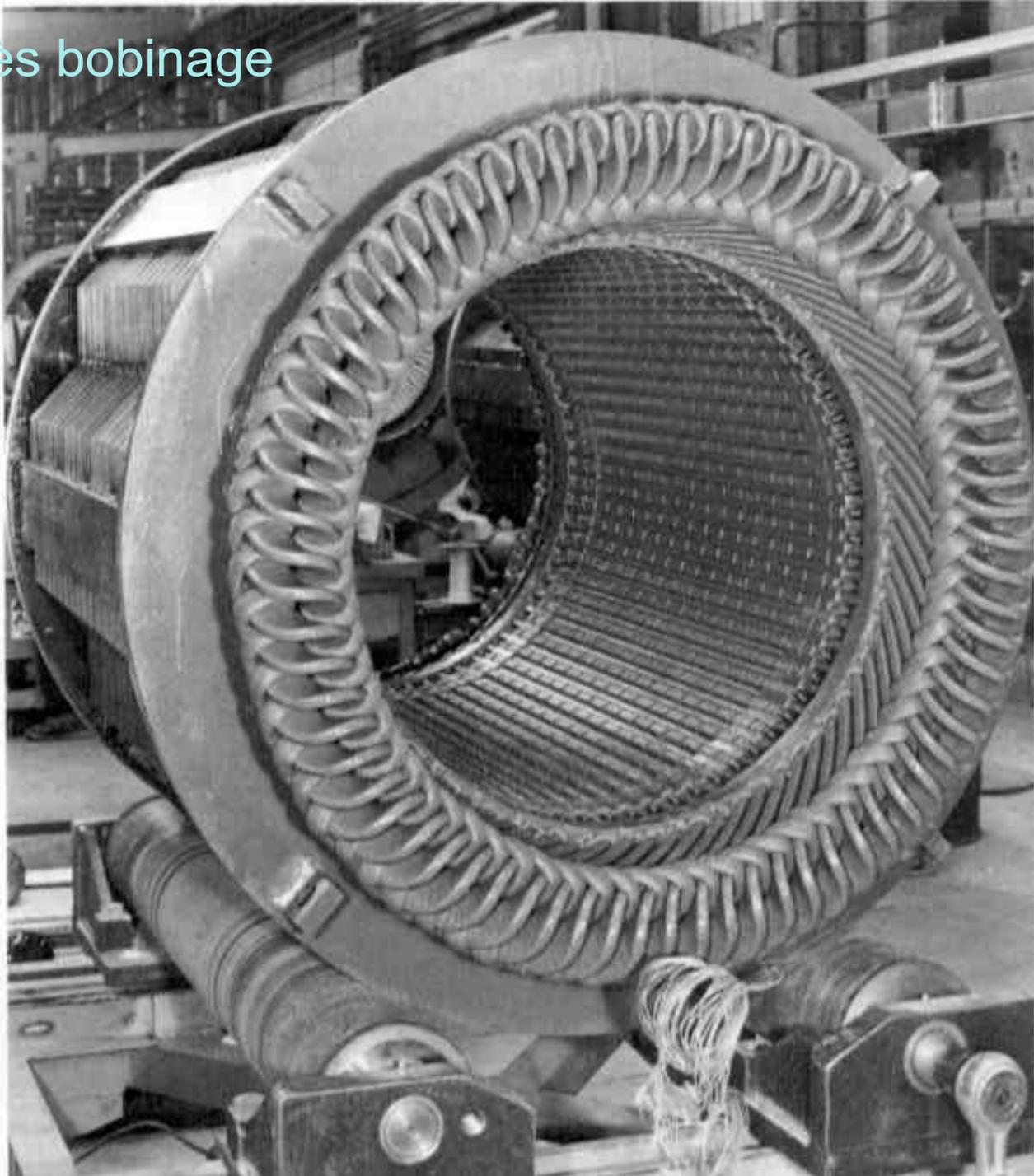
Plaque à bornes

Plaque signalétique

# Stator avant bobinage



# Stator après bobinage

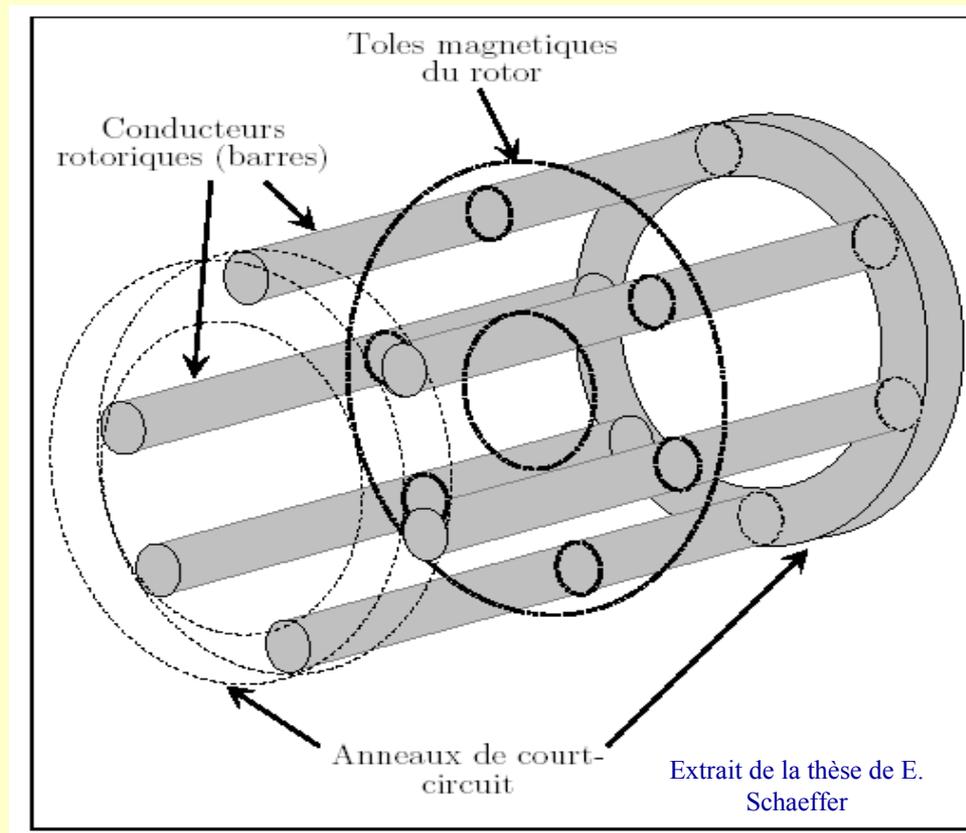




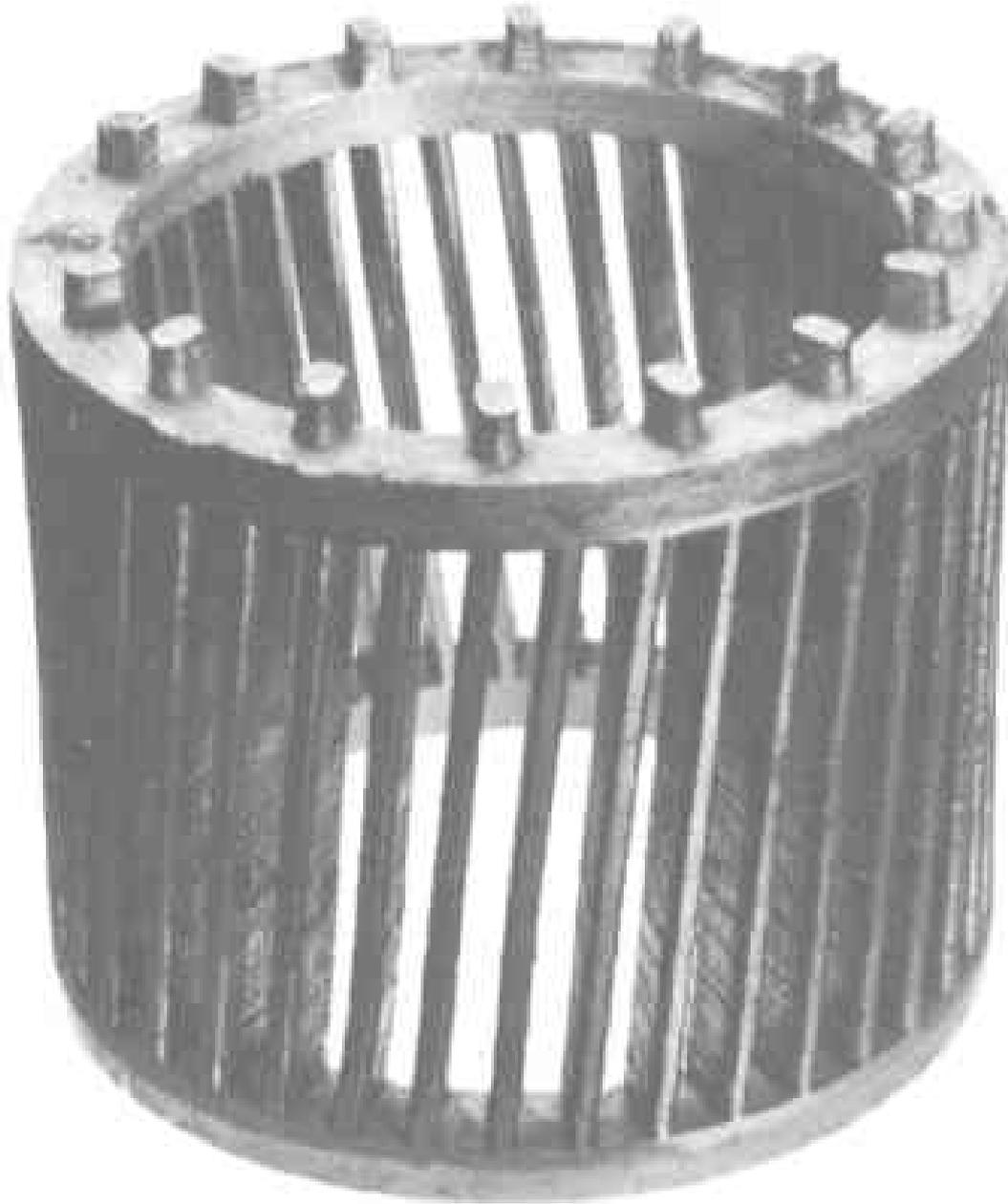
# ***Le rotor***

## Rotor en cage d 'écureuil

Le rotor est constitué d 'un ensemble de conducteurs en court-circuit appelé « cage d 'écureuil »

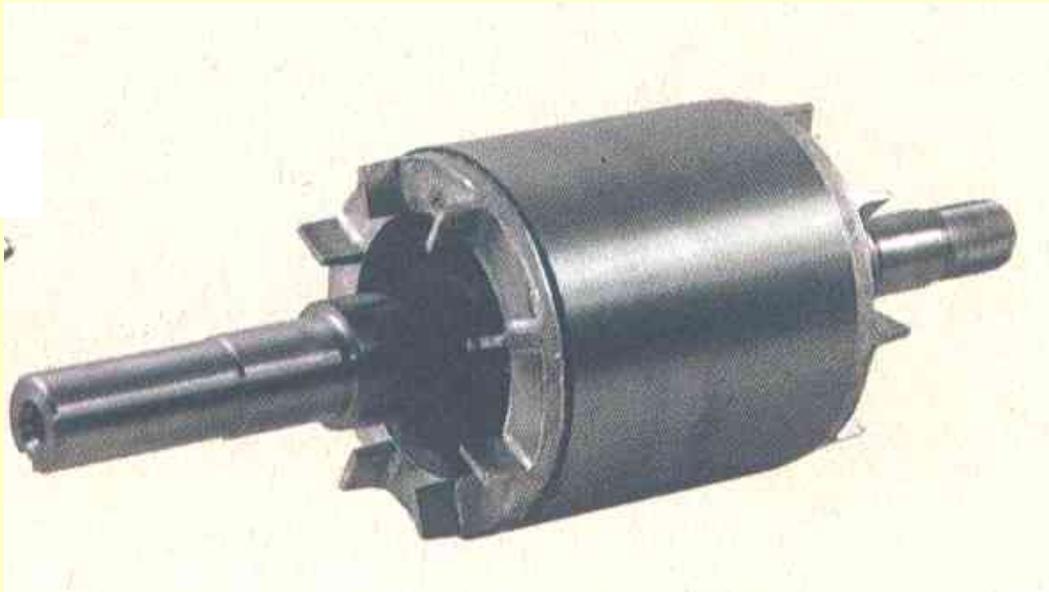


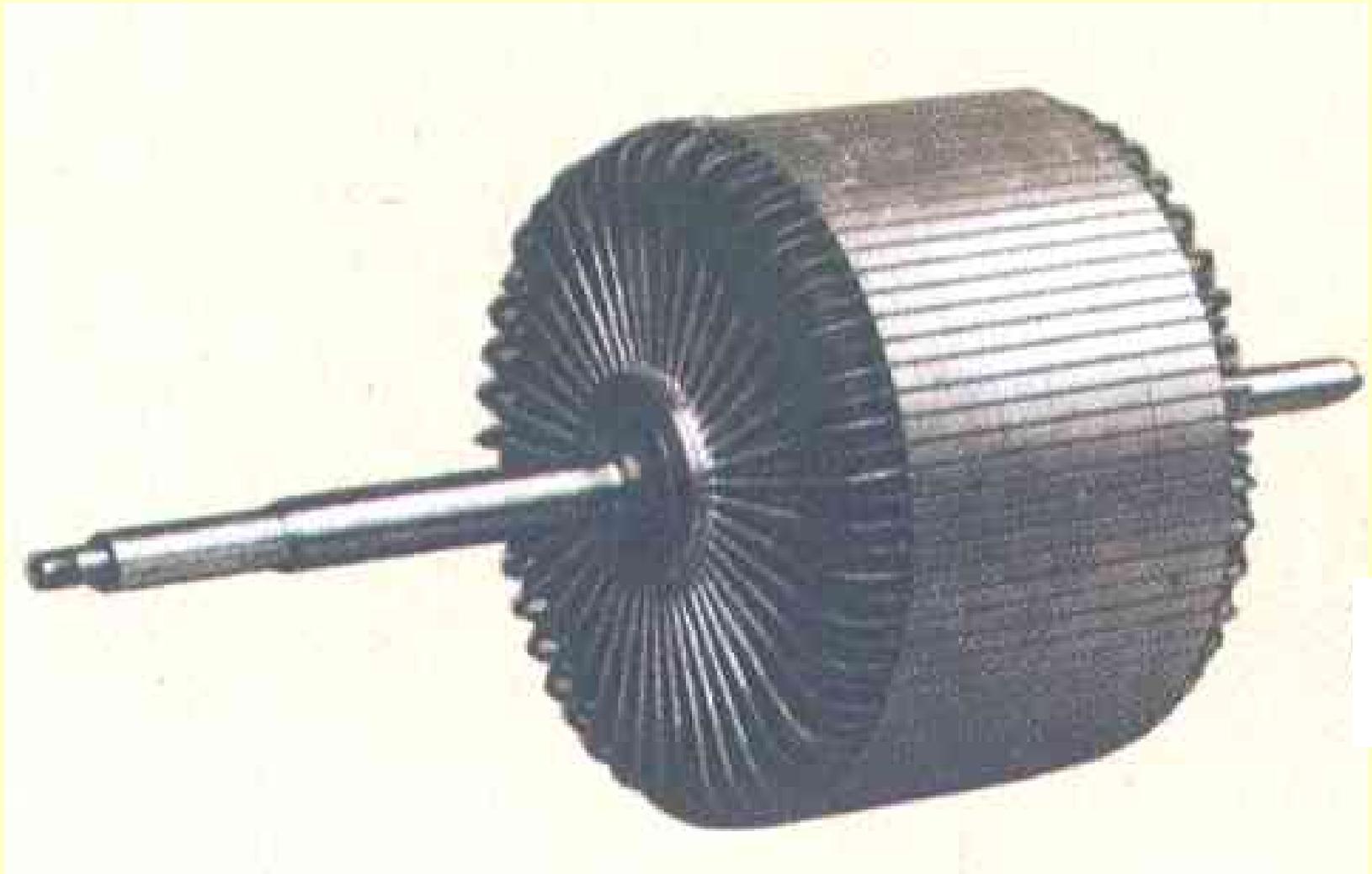
## Cage d'écureuil en aluminium moulé



**Afin d'éviter les "points morts" et de régulariser le couple, le nombre de dents rotoriques est choisi différent de celui du stator et ses encoches sont inclinées (montage des tôles sur un mandrin avec jonc hélicoïdal).**

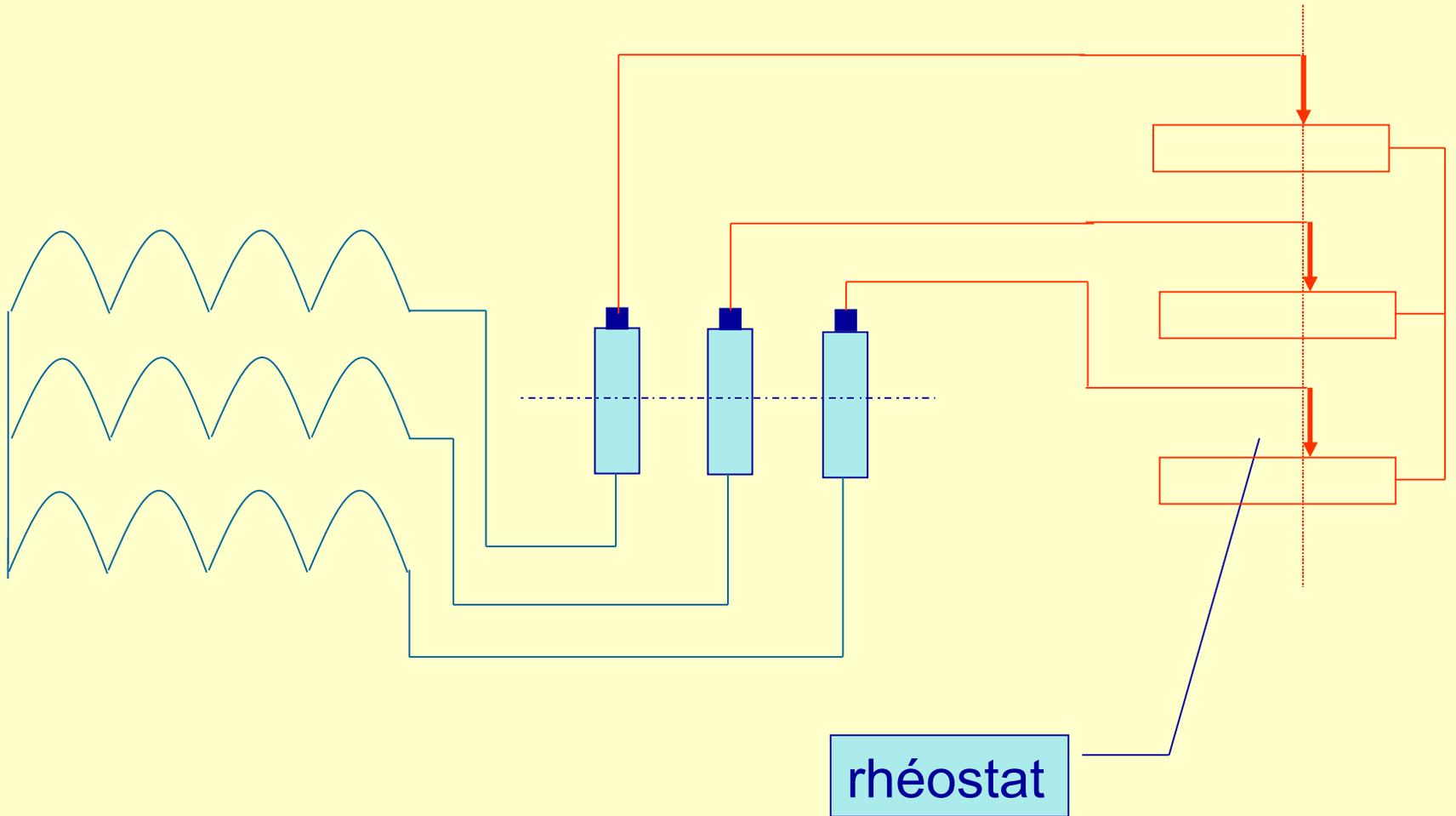


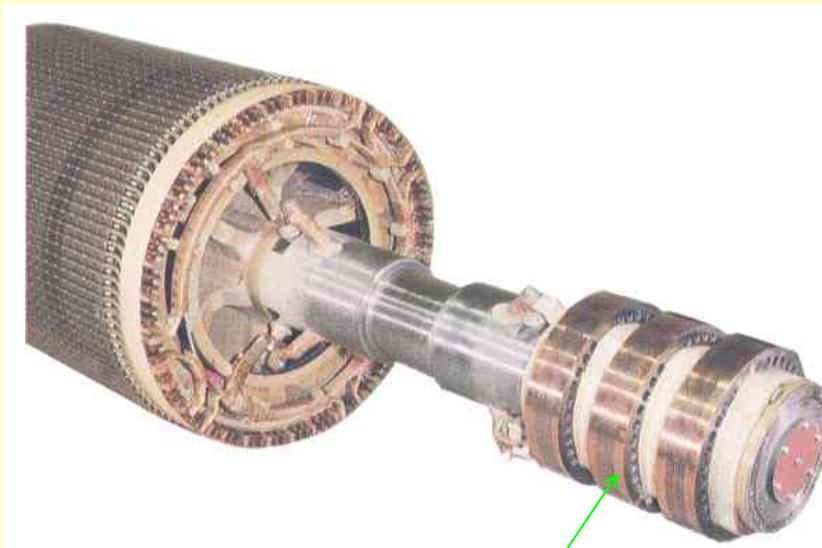




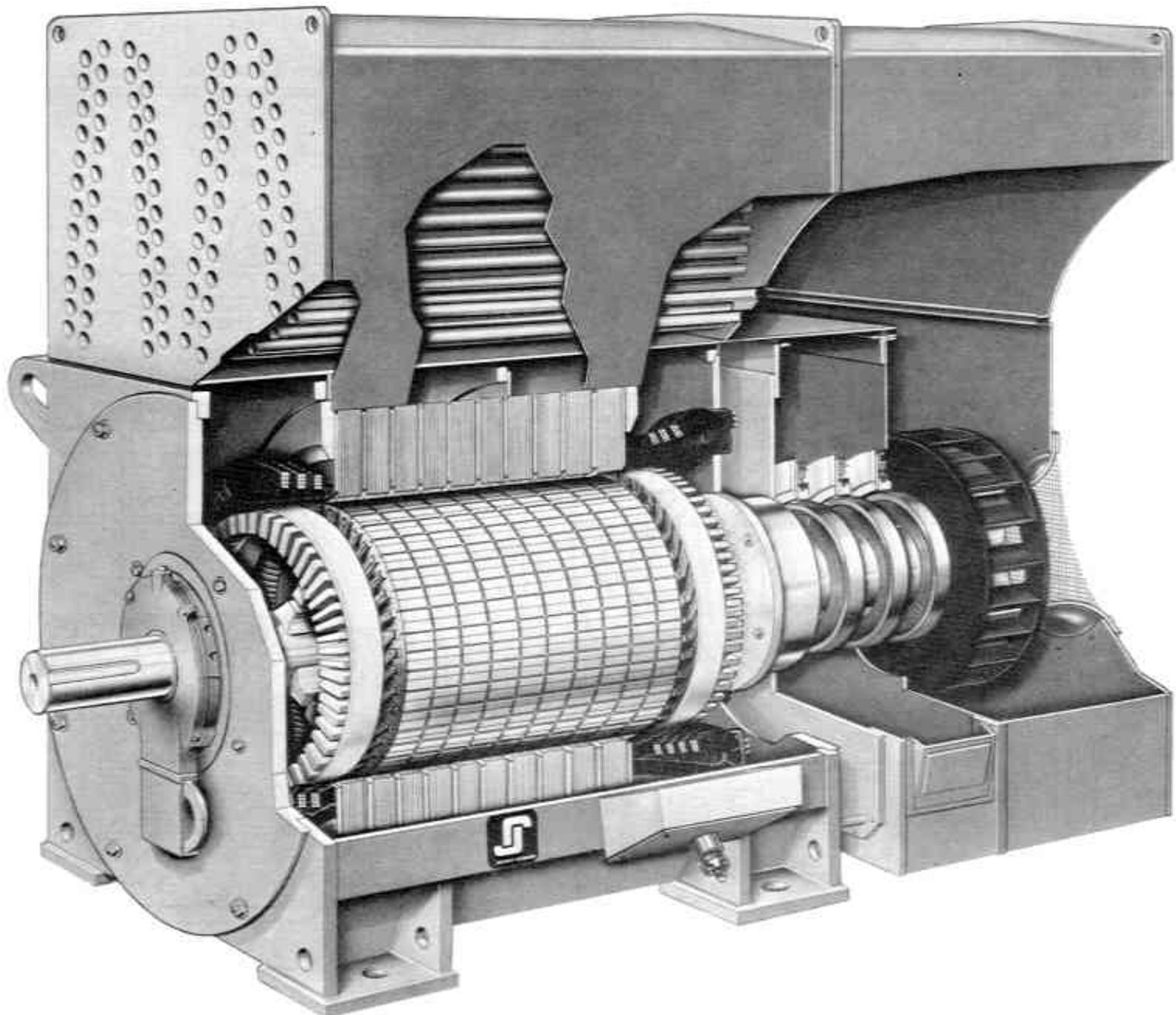


# Rotor bobiné





les 3 bagues d'un rotor bobiné

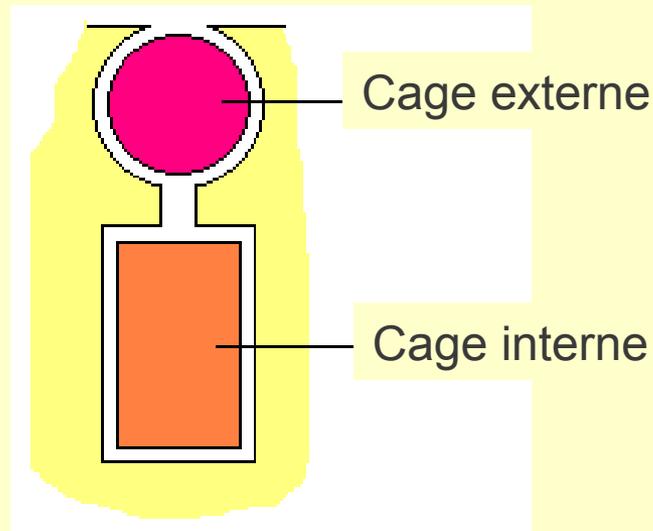


**Le rotor bobiné présente un couple de démarrage élevé avec un appel de courant réduit.**

**Le moteur à double cage arrive à concilier la simplicité et la robustesse du moteur à cage et les qualités du rotor bobiné.**

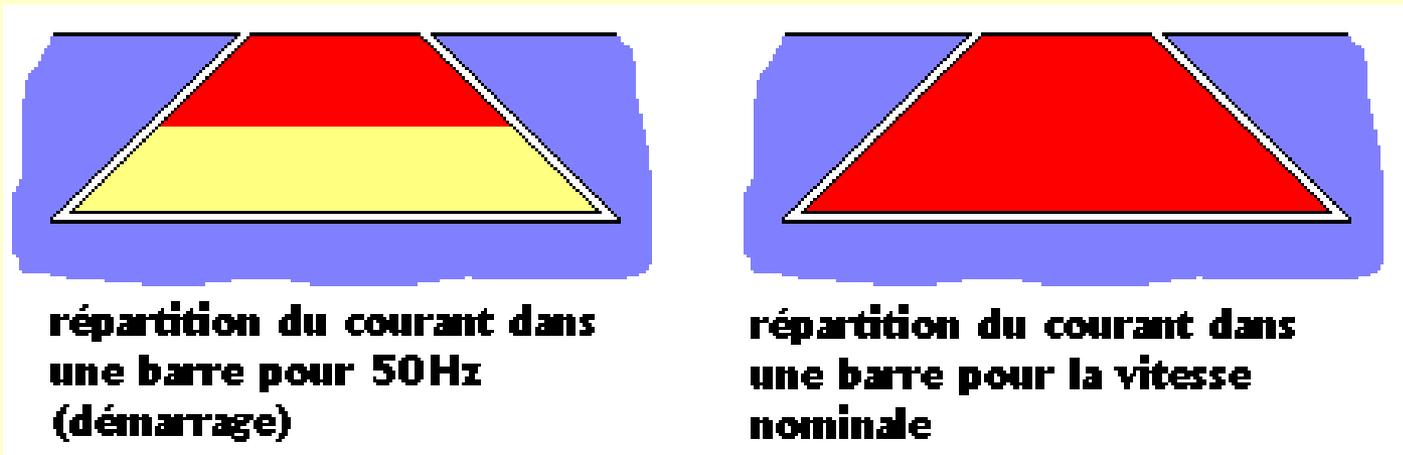
**Le rotor possède deux cages concentriques:**

- la cage externe, de grande résistance.
- la cage interne, plus inductive parce qu'entourée de fer.

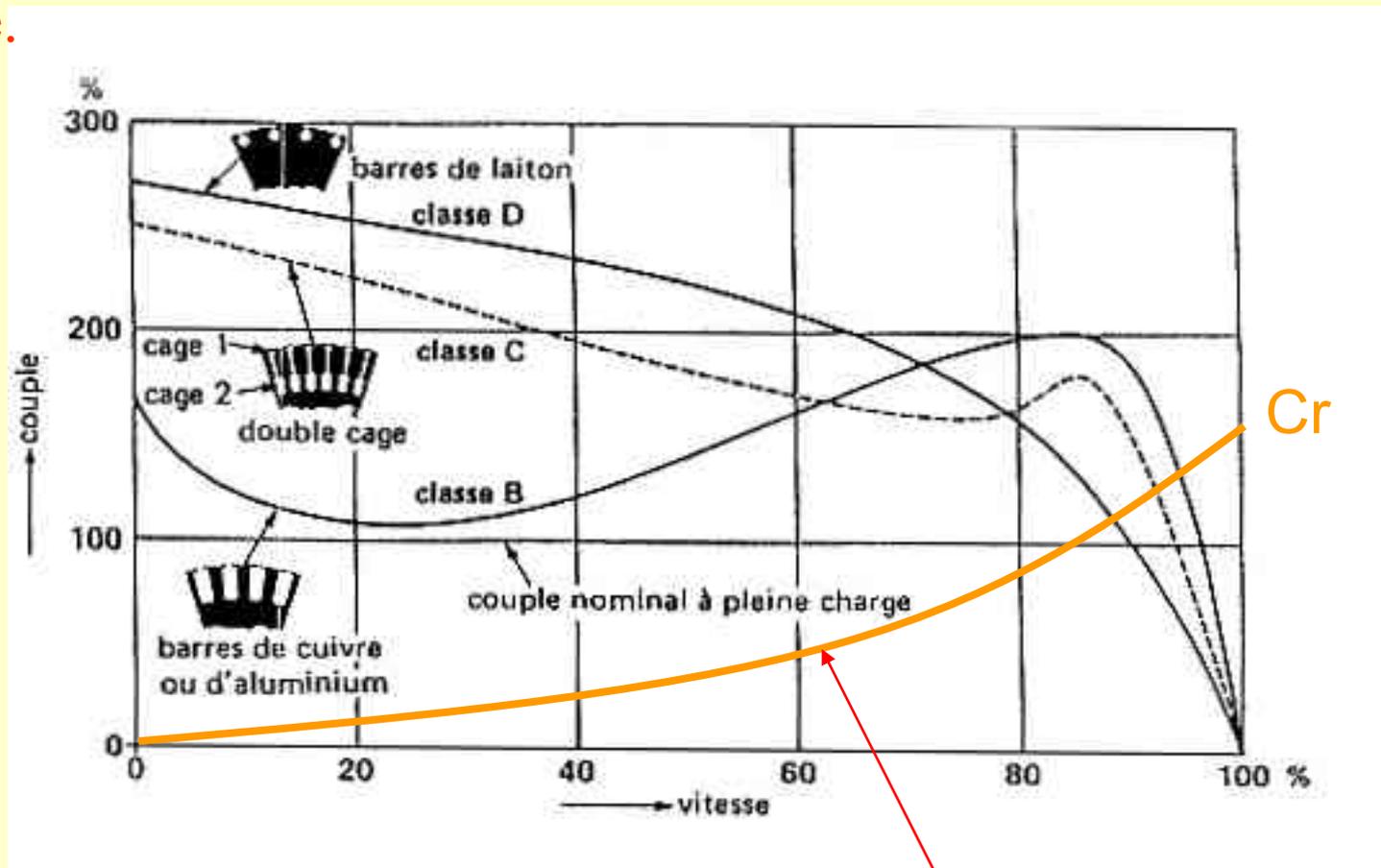


**Au démarrage, la fréquence des courants rotoriques est élevée. La grande réactance de la cage interne, combinée à l'effet pelliculaire, favorise le passage du courant dans la cage externe. A la vitesse nominale, la fréquence rotorique étant faible, seule la cage interne, de faible résistance est active.**

**Le moteur à encoches profondes utilise l'effet pelliculaire. A 50 Hz, l'épaisseur de pénétration dans le cuivre est de 1 cm environ. Quand la vitesse du moteur croît, la fréquence des courants rotoriques diminue, l'épaisseur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue sans aucune intervention extérieure.**



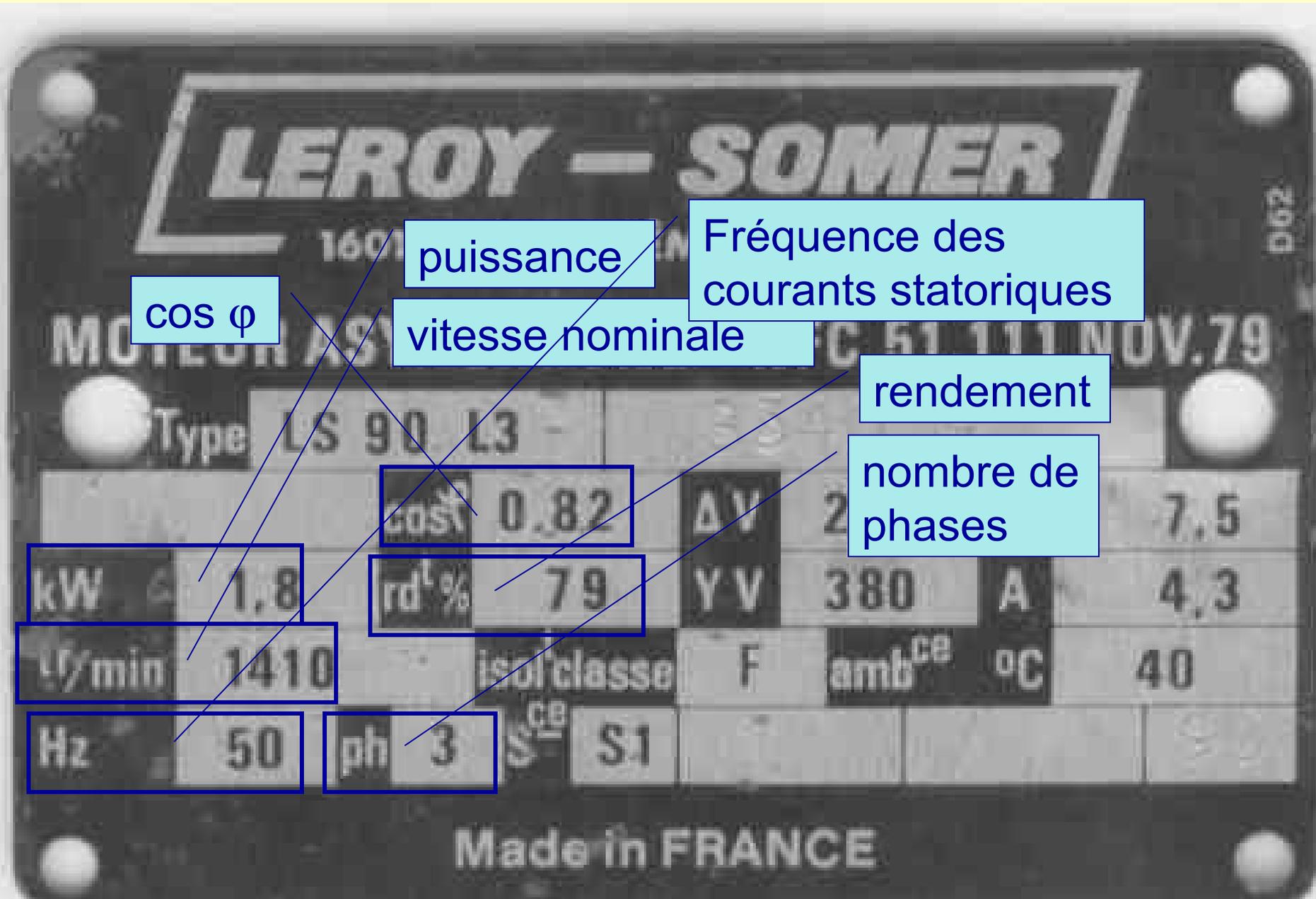
Plus de couple au démarrage sans plus d'appel de courant?...Résistance rotorique « variable » avec machine à cage.



Caractéristique de couple de charge quadratique

# ***La plaque signalétique***

# Plaque signalétique



# Plaque signalétique

tension maximum aux bornes  
d'un enroulement

tension maximum entre  
l'extrémité d'un enroulement et  
le neutre

		$\cos\phi$	0.82	$\Delta V$	220	A	7.5
kW	1.8	$\text{rd}^1\%$	79	$Y V$	380	A	4.3
$\omega/\text{min}$	1410	isol <sup>1</sup> classe	F	amb <sup>CB</sup>	°C	40	
Hz	50	ph	3	S <sup>CB</sup>	S1		

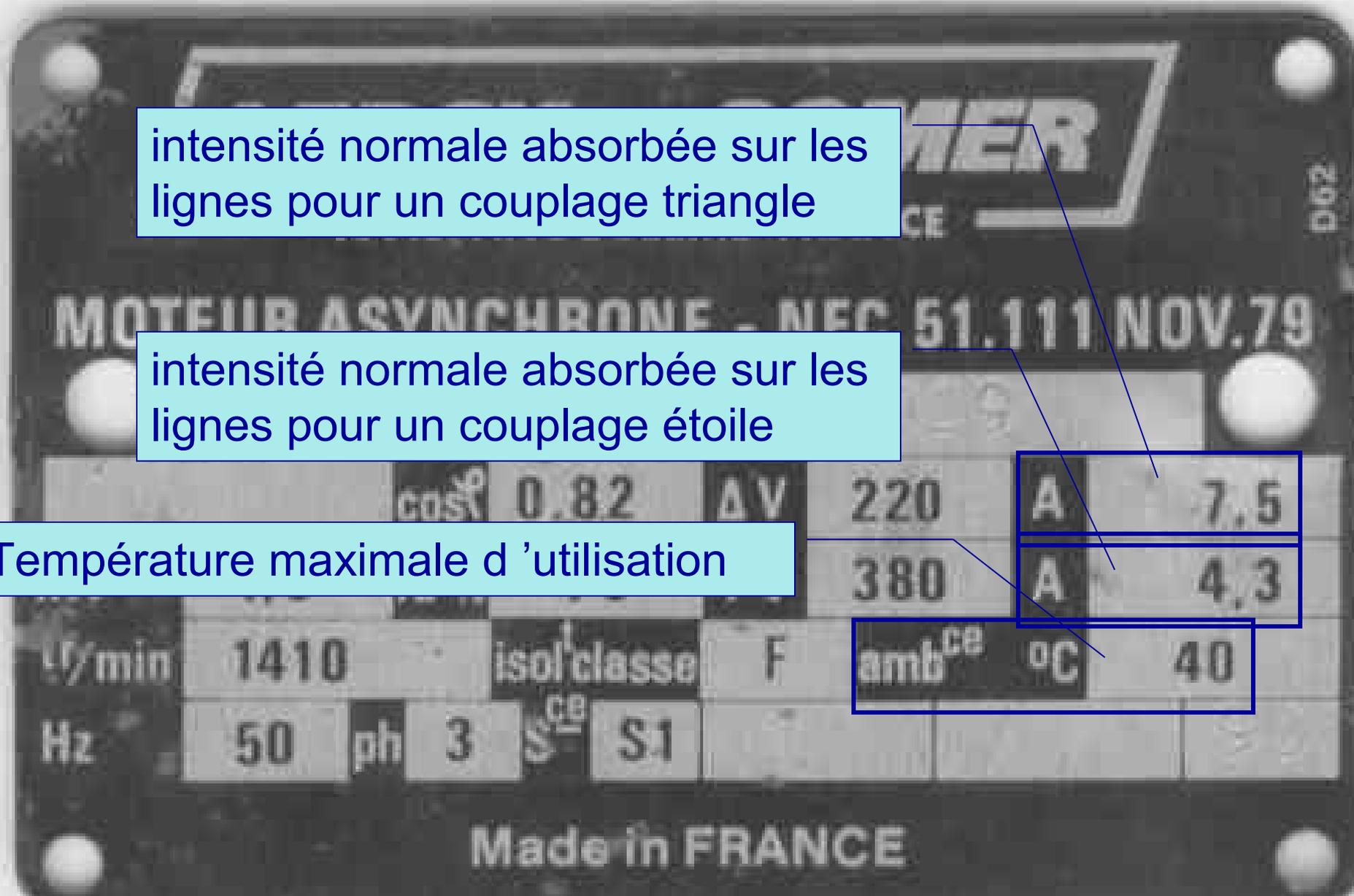
Made in FRANCE

# Plaque signalétique

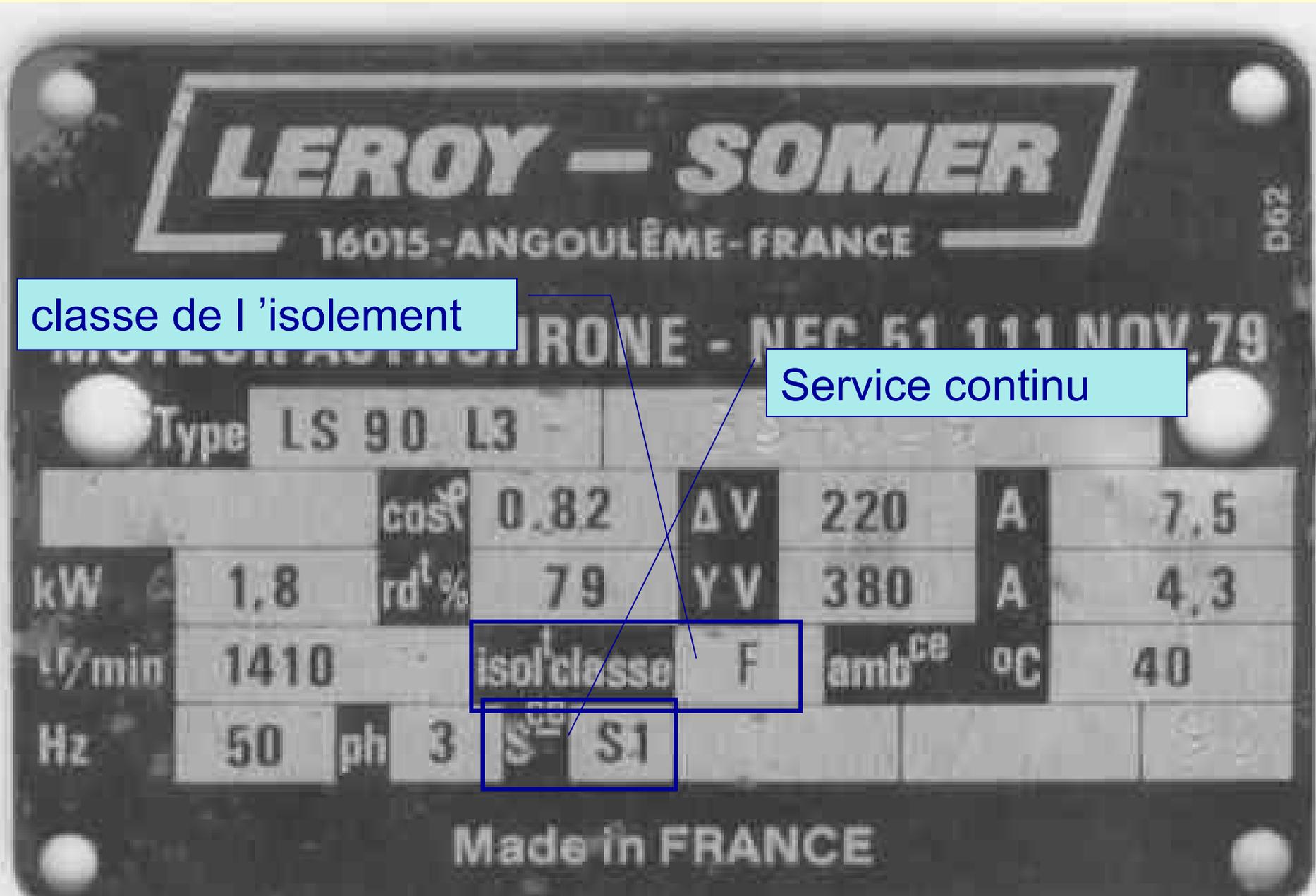
intensité normale absorbée sur les lignes pour un couplage triangle

intensité normale absorbée sur les lignes pour un couplage étoile

Température maximale d'utilisation



# Plaque signalétique



## Indice de protection IP

premier chiffre = degré de protection des personnes contre l'accès aux parties dangereuses et la protection des matériels contre la pénétration des corps étrangers

deuxième chiffre = degré de protection contre les effets nuisibles de la pénétration de l'eau

protection maximum = IP 68

IP 54 = protection contre la pénétration des poussières et protection contre les projections d'eau

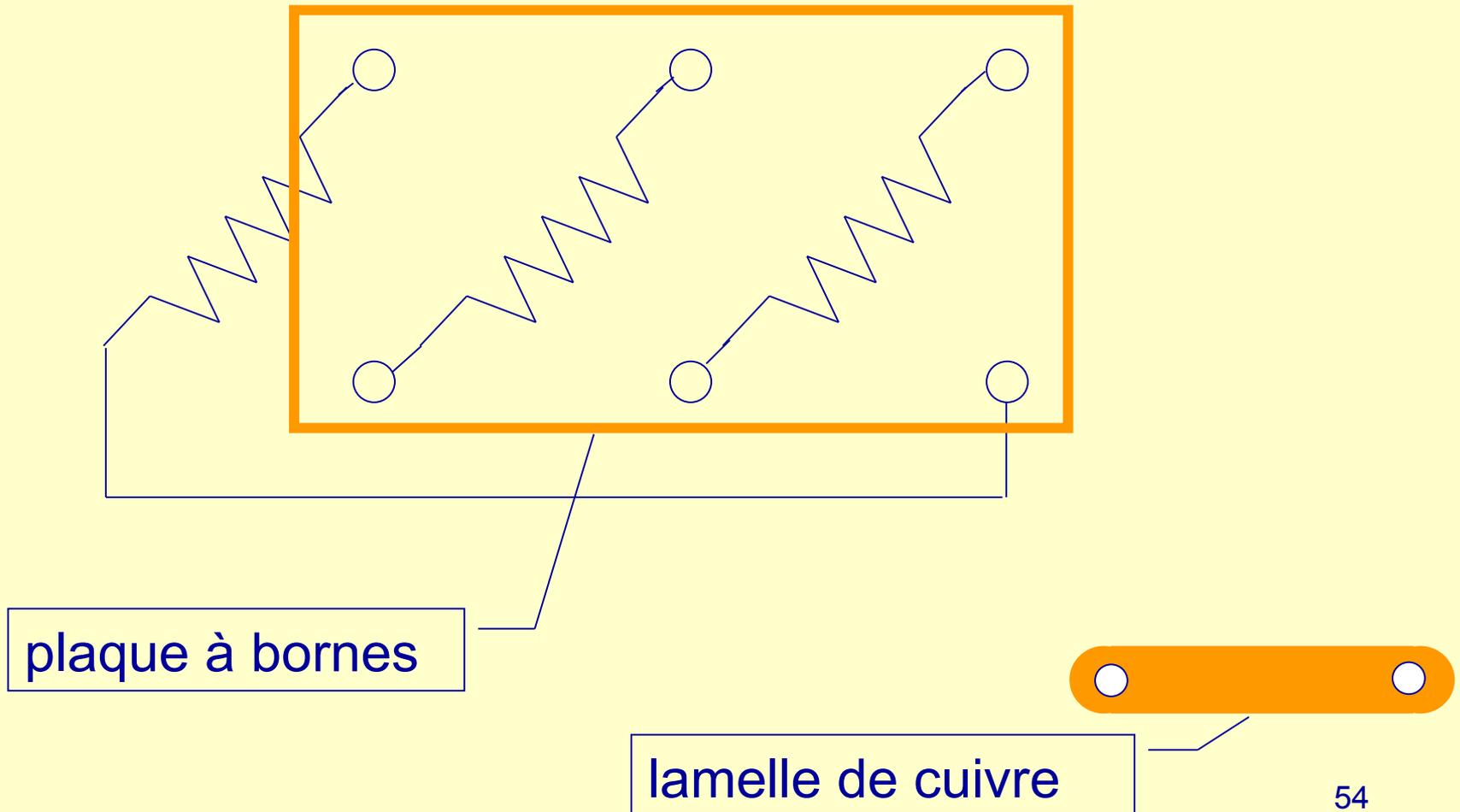
# Plaque signalétique

The image shows a metal nameplate for a CEM motor. The brand name 'CEM' is prominently displayed at the top left, with 'Co Electro-Mécanique' written below it. To the right, the model name 'COMPACT' is visible. The nameplate is divided into several rows of technical specifications. A blue callout box with a white border points to the 'IP 55' rating, which is located in the row containing '50 Hz'. The callout box contains the text: 'IP 55 = protection contre la pénétration des poussières et protection contre les jets d'eau'. At the bottom of the nameplate, it says 'MADE IN FRANCE NFC 5111-75'.

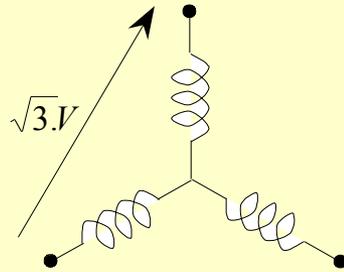
CEM		COMPACT	
Co Electro-Mécanique			
Mot. as.	MEUB 132		
N° FL	9361960	~3	
KW	7,5	CL. E	
50 Hz	IP 55		Kg
V Δ	220	28,3	A
V Y	380	16,33	A
/min	1430	S 1	
/min			
MADE IN FRANCE NFC 5111-75			

***La plaque  
à  
bornes***

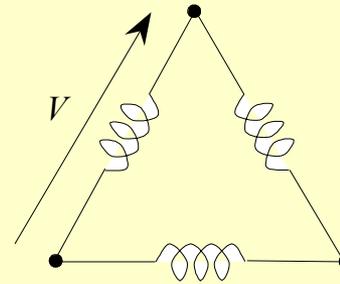
# Disposition des enroulements du stator à partir de la plaque à bornes



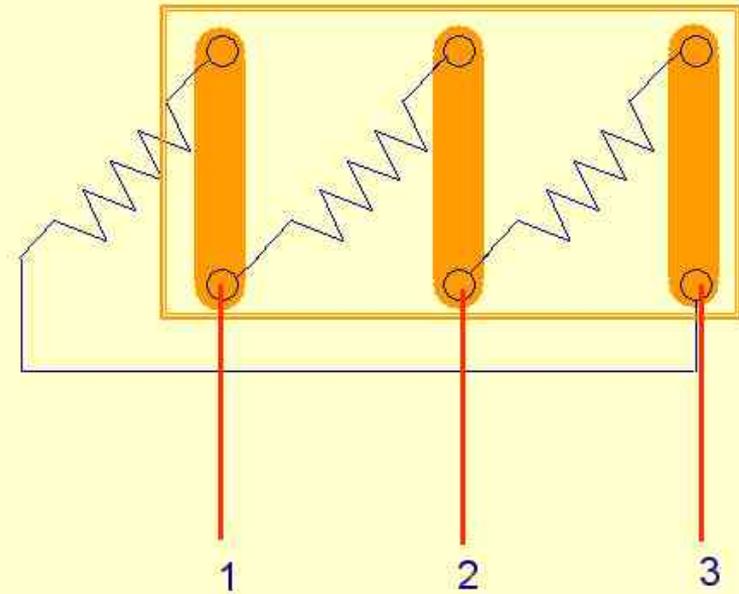
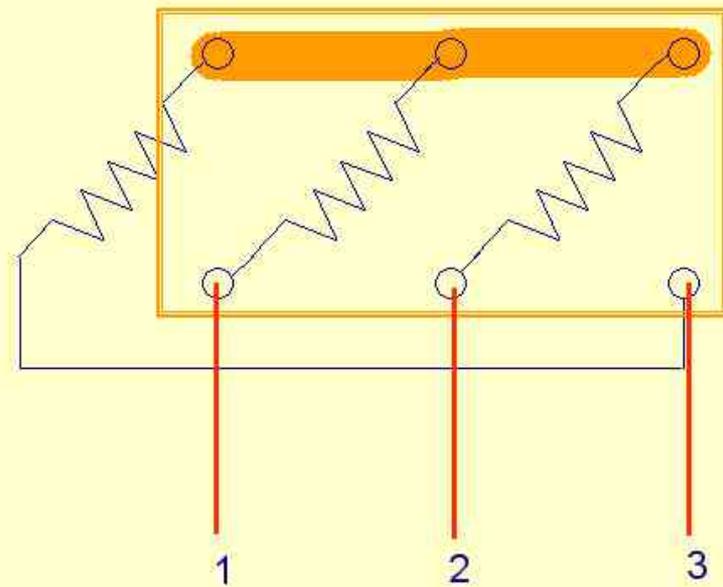
# Couplage



Couplage étoile



Couplage triangle

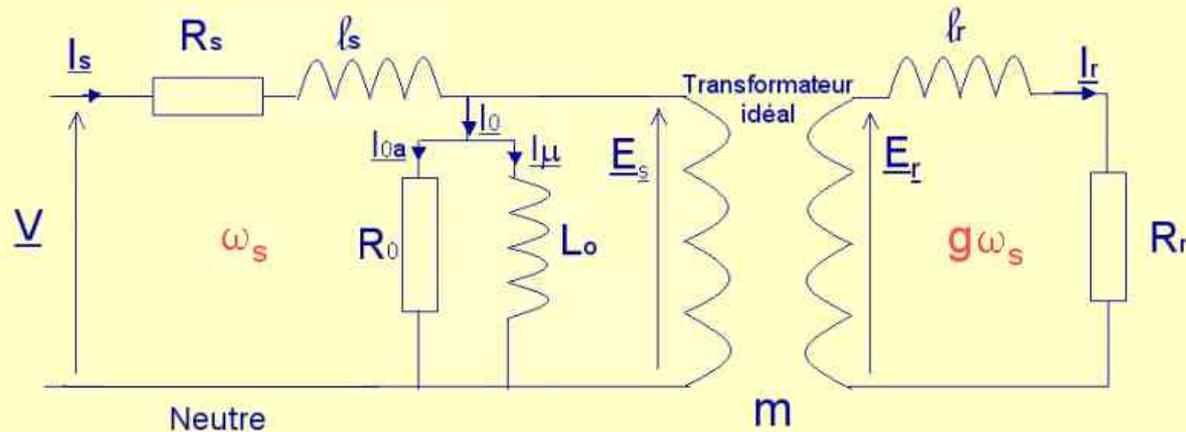


# **Modélisation de la machine asynchrone**

**Etablissement du modèle électrique  
d'une phase de la machine  
asynchrone**

# La machine asynchrone est un transformateur à champ tournant en court-circuit

## Schéma équivalent pour une phase (machine couplée en étoile)



- Inductance de fuite d'une phase stator:  $l_s$
- Inductance de fuite d'une phase rotor :  $l_r$
- Résistance d'une phase stator:  $R_s$
- Résistance d'une phase rotor :  $R_r$
- Inductance « magnétisante »  $L_o$
- Résistance qui symbolise les pertes fer au stator:  $R_o$
- Nombre de paires de pôles  $p$

Quelle est la fréquence des courants rotorique ?

On définit le glissement comme suit :

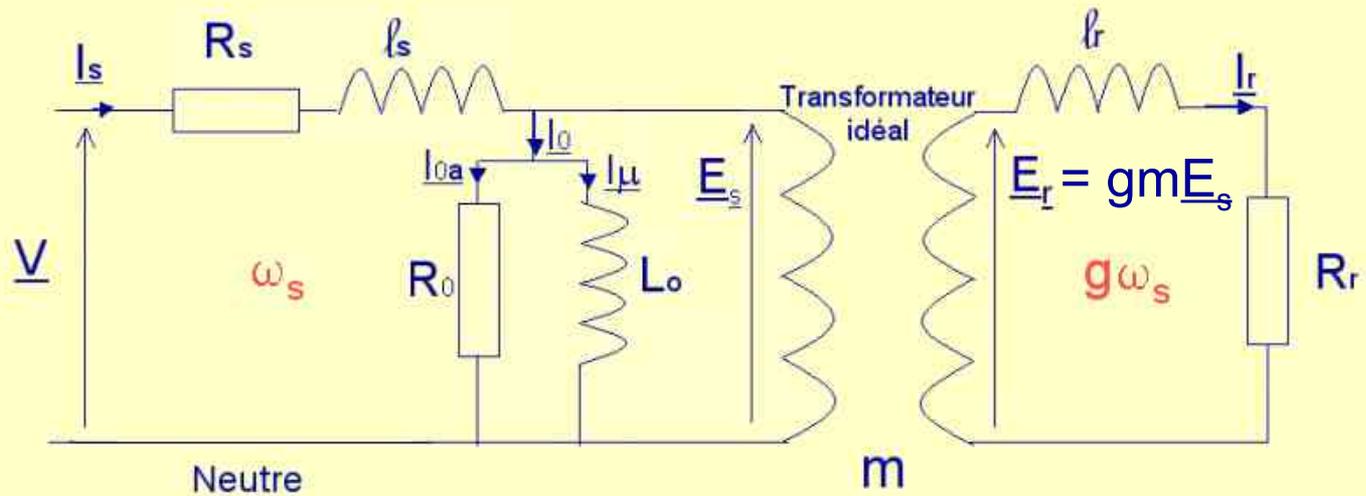


Le rotor et le stator ayant  $p$  paires de pôles, la fréquence des f.é.m. rotoriques est donc fonction de la différence des vitesses du stator et du rotor.

$$f_r = p \cdot (N_s - N_r) = p(g \cdot N_s)$$

Avec  $N_s = f_s/p$  on obtient:



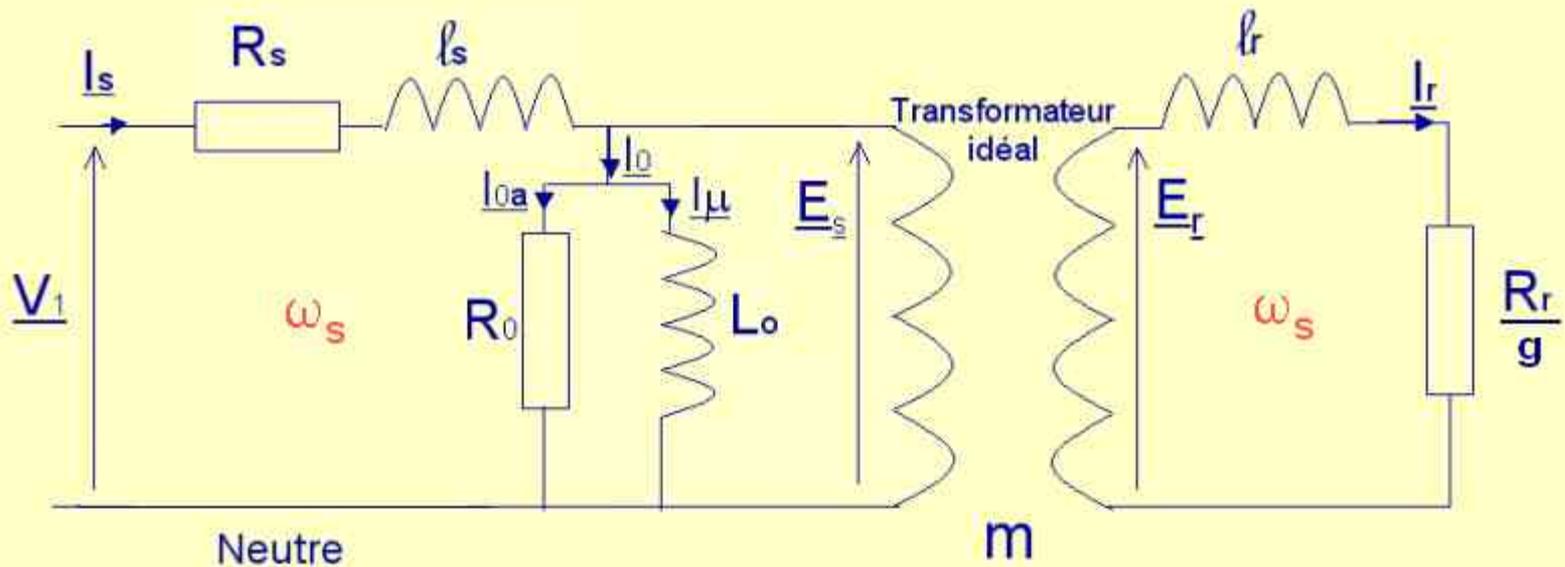


Pour une phase du stator :

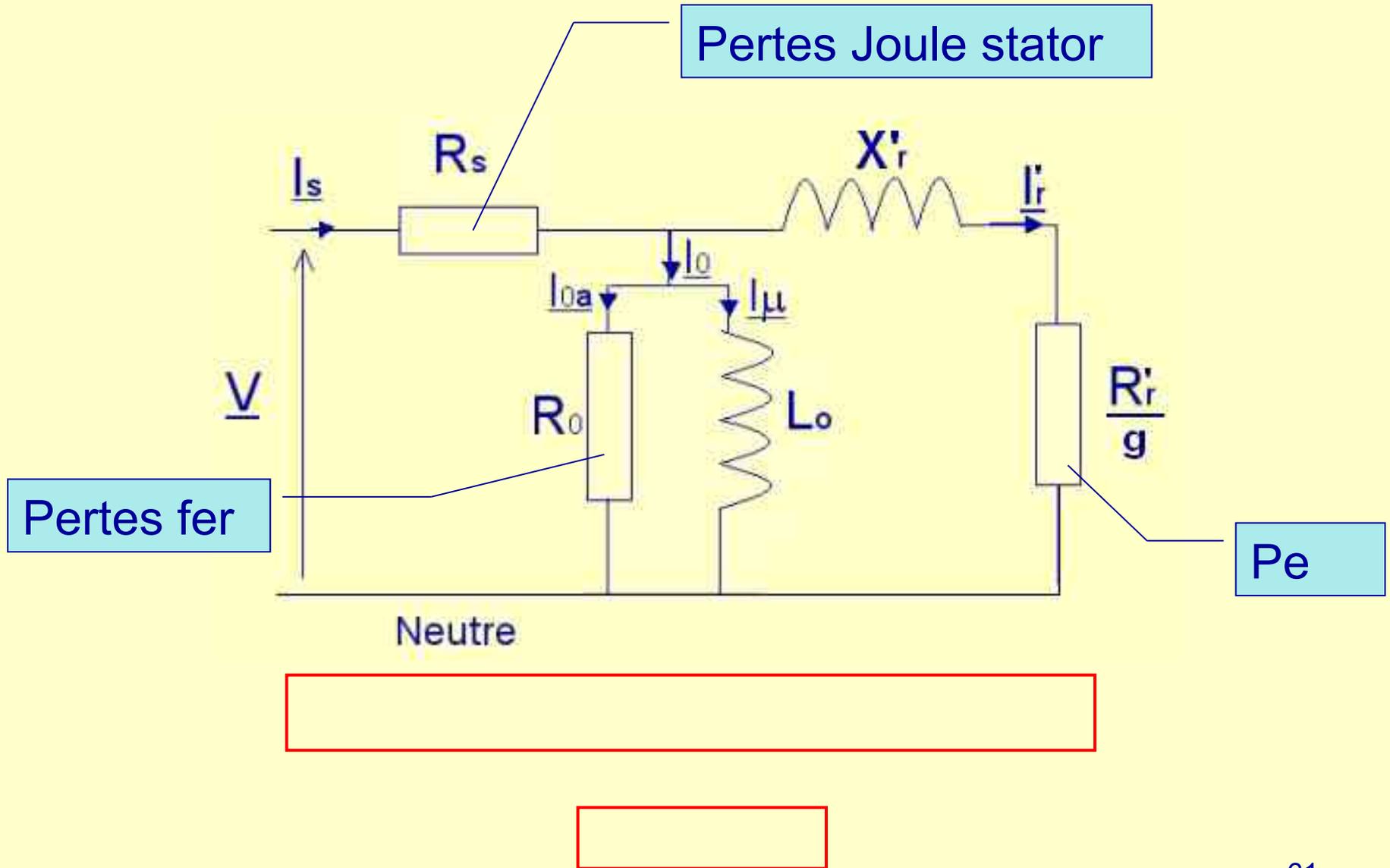
Pour une phase du rotor :

En divisant par  $g$ , on obtient :

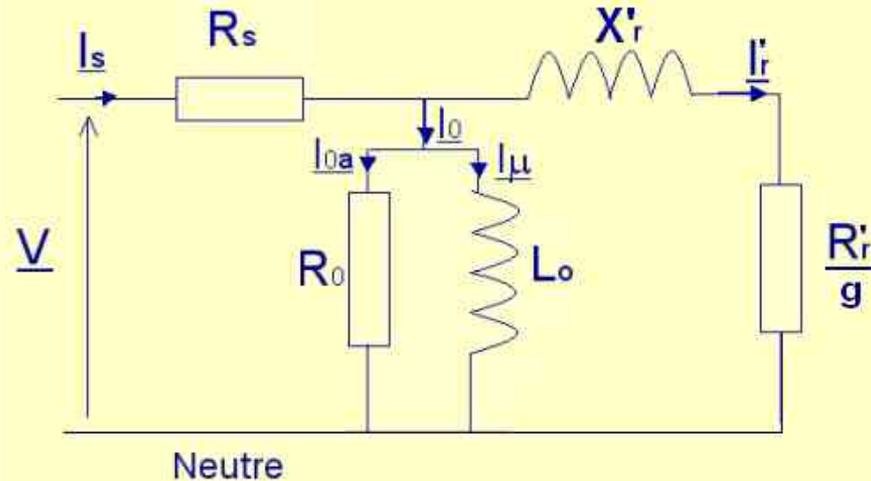
D'où le schéma équivalent suivant :



Il est possible de ramener les éléments du rotor au stator



## Détermination des éléments du schéma équivalent



- Essai à vide ou rotor ouvert  $g \approx 0 \Rightarrow R'_r/g = \infty$

On mesure  $I_0$ ,  $P_0$  et  $\cos \varphi_0$ , on en déduit  $R_0$  et  $L_0$ .

- On mesure  $R_s$  à chaud.

- Essai à l'arrêt  $g=1$  (rotor bloqué) sous tension réduite et courant nominal.

On mesure  $I_{cc}$ ,  $P_{cc}$  et  $\cos \varphi_{cc}$ , on en déduit  $R'_r$  et  $X'_r$ .

***Bilan de puissance du  
moteur  
asynchrone***

Puissance absorbée  
 $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\varphi$

Pertes magnétiques stator

$$\frac{3V^2}{R_o} \text{(en Y) ou} \\ \frac{3U^2}{R_o} \text{(en } \Delta \text{)}$$

Pertes Joule stator

$$3R_s I_s^2 \text{(en Y) ou} \\ 3R_s J_s^2 \text{(en } \Delta \text{)}$$

Puissance transmise au rotor  
 $P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$

Pertes magnétiques rotor  $\approx 0$

Pertes Joule rotor

$$3 R'_r \cdot I_r'^2 \text{ ou} \\ 3 R_r \cdot I_r^2$$

Puissance mécanique  
 $P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$

Pertes mécaniques  $P_{mec}$

Puissance utile  
 $P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$

Puissance absorbée  
 $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\varphi$

Pertes magnétiques stator

Pertes Joule stator

Puissance transmise au rotor  
 $P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$

Pertes magnétiques rotor  $\approx 0$

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique  
 $P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$

Pertes mécaniques

Puissance utile  
 $P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$

stator

rotor

Puissance absorbée  
 $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_s \cdot \cos\varphi$

Pertes magnétiques stator

Pertes Joule stator

Puissance transmise au rotor  
 $P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$

Pertes magnétiques rotor  $\approx 0$

Pertes Joule rotor

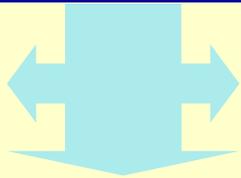
Puissance mécanique  
 $P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$

Pertes mécaniques

La transmission de puissance au rotor se fait avec perte de vitesse mais à couple constant

Puissance utile  
 $P_u = C_u \cdot (2\pi \cdot N_r)$

Puissance transmise au rotor  
 $P_e = C_e \cdot (2\pi \cdot N_s)$



Pertes magnétiques rotor  $\approx 0$

Pertes Joule rotor

Puissance mécanique

$$P_m = C_e \cdot (2\pi \cdot N_r)$$



La différence de puissance est perdue par effet Joule dans le rotor



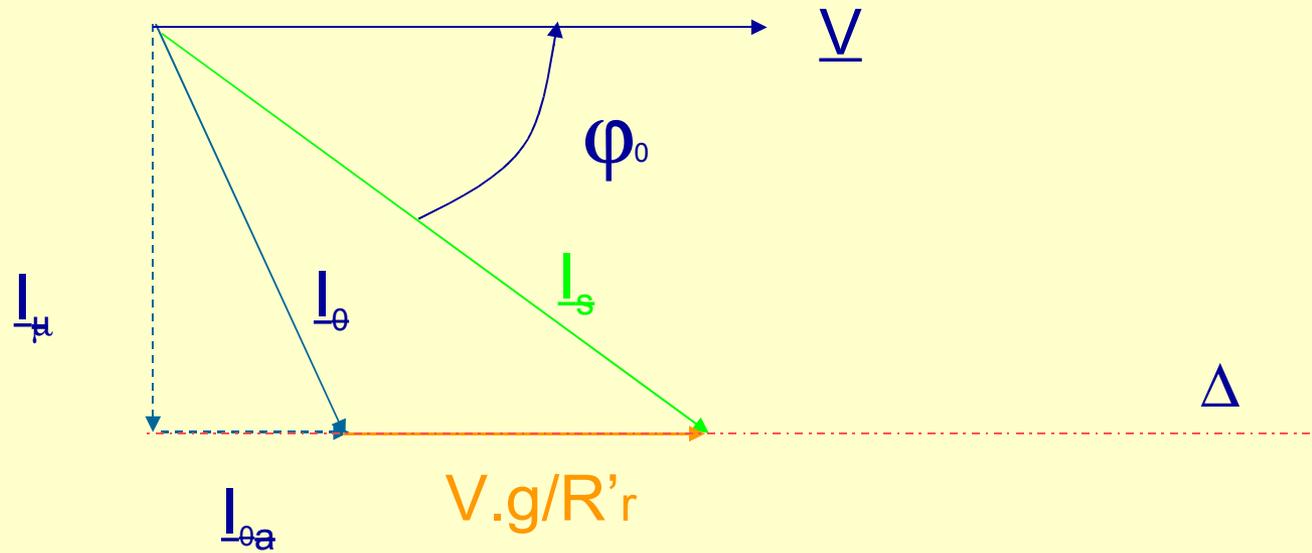
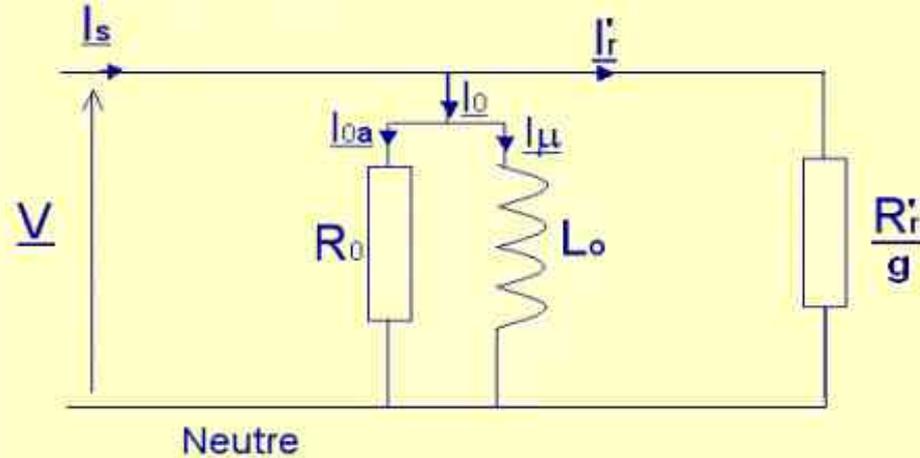
# Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_m} \cdot \frac{P_m}{P_e} \cdot \frac{P_e}{P_a} < \frac{P_m}{P_e}$$

$$\frac{P_m}{P_e} = \frac{N_r}{N_s} = 1 - g \Rightarrow \eta < \frac{N_r}{N_s} = 1 - g$$

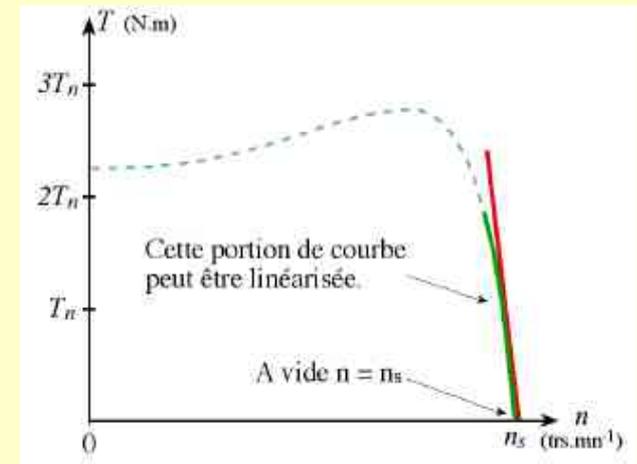
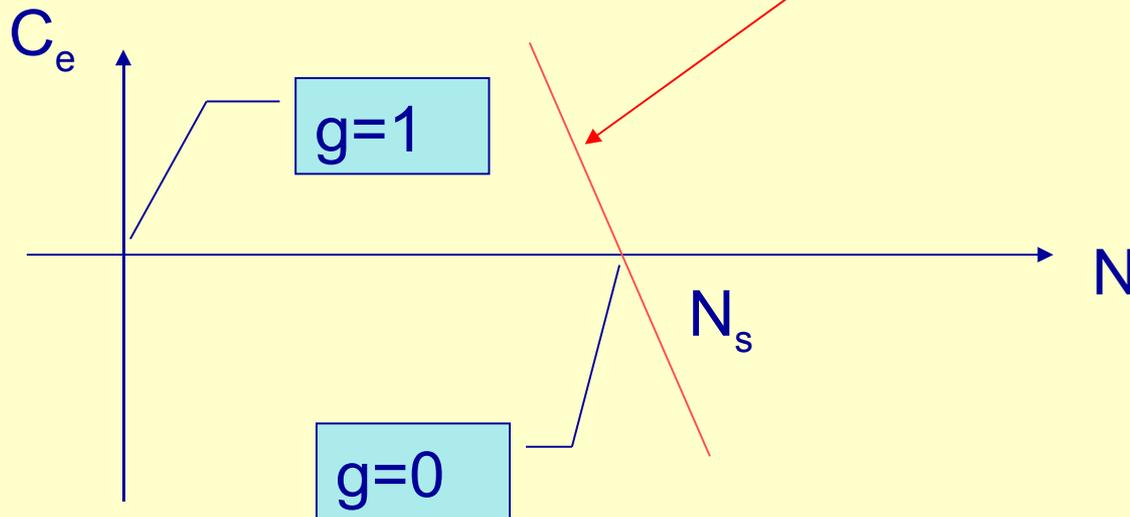
# Couple et courant à faible glissement

On suppose :  $R_2/g \gg X'_r = L'_r \omega$  et  $R_s$  négligé, le schéma équivalent devient :



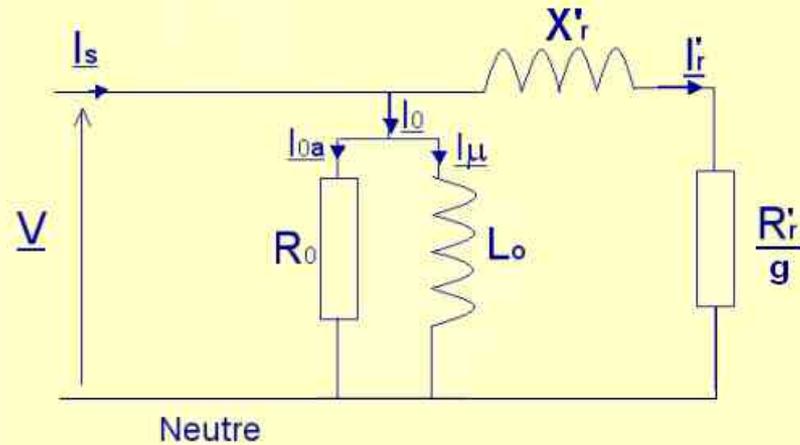
$$Pe = 3 \frac{R'_r}{g} I'_{r^2} = 3 \frac{R'_r}{g} \frac{V^2}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = C_e \cdot \Omega_s$$

$$C_e = \frac{3}{\Omega_s} \frac{V^2 g}{R'_r} = k V^2 g$$



# Couple et courant à fort glissement

Rs négligé



$$Pe = 3 \frac{R'_r}{g} I'^2_r = 3 \frac{R'_r}{g} \frac{V^2}{(X'_r)^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = Ce \cdot \Omega_s$$

$$Ce = \frac{3}{\Omega_s} \frac{R'_r}{g} \frac{V^2}{(X'_r)^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = 3p \frac{V^2}{\omega_s} \frac{\frac{R'_r}{g}}{(X'_r)^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2}$$

Le couple est maximum pour  $X'_r = \frac{R'_r}{g}$

On pose  $g_m = \frac{R'_r}{X'_r}$

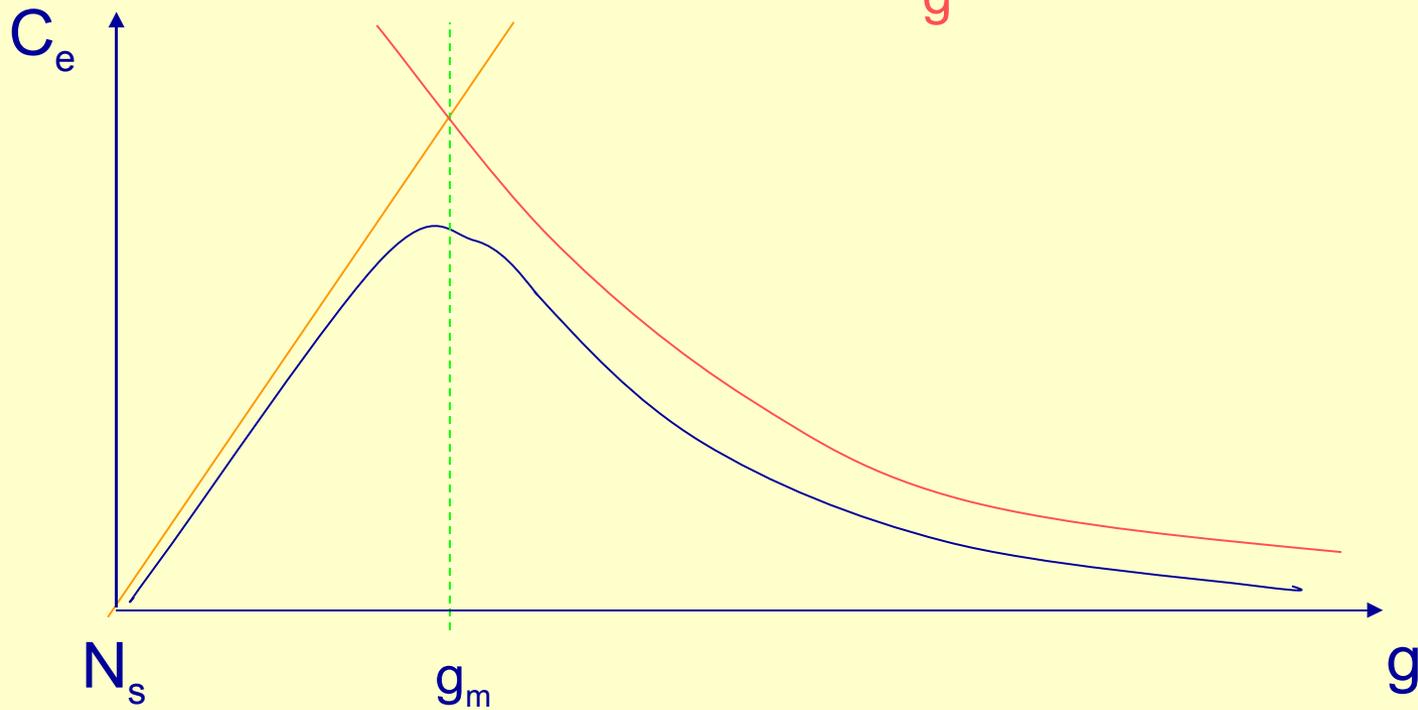
$$C_e = 3p \frac{V^2}{\omega_s} \frac{2X'_r}{2X'_r} \frac{\frac{R'_r}{g}}{\left(X'_r\right)^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2}$$

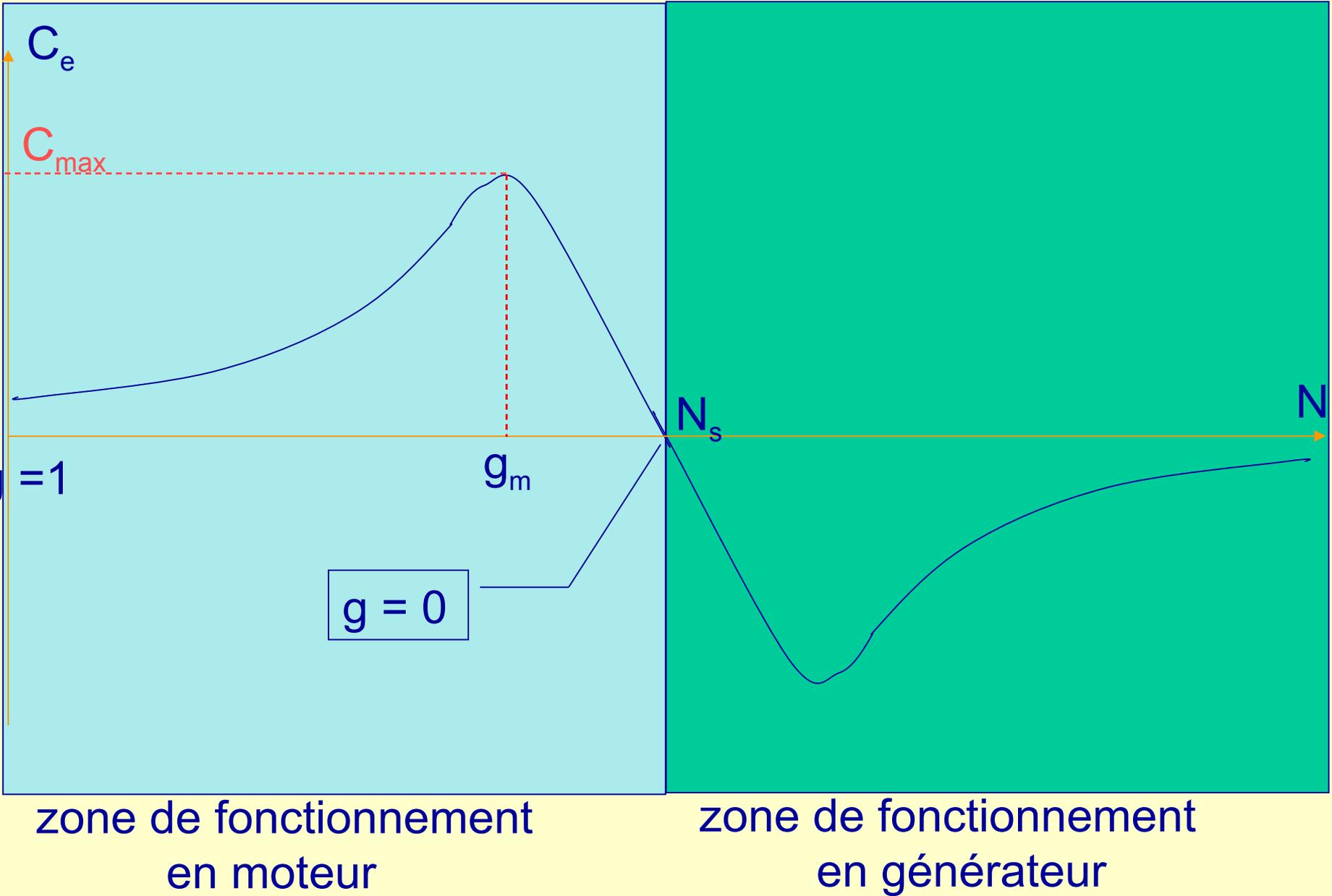
$$g \ll g_m$$

$$C_e = K V^2 \frac{g}{g_m}$$

$$g \gg g_m$$

$$C_e = K V^2 \frac{g_m}{g}$$

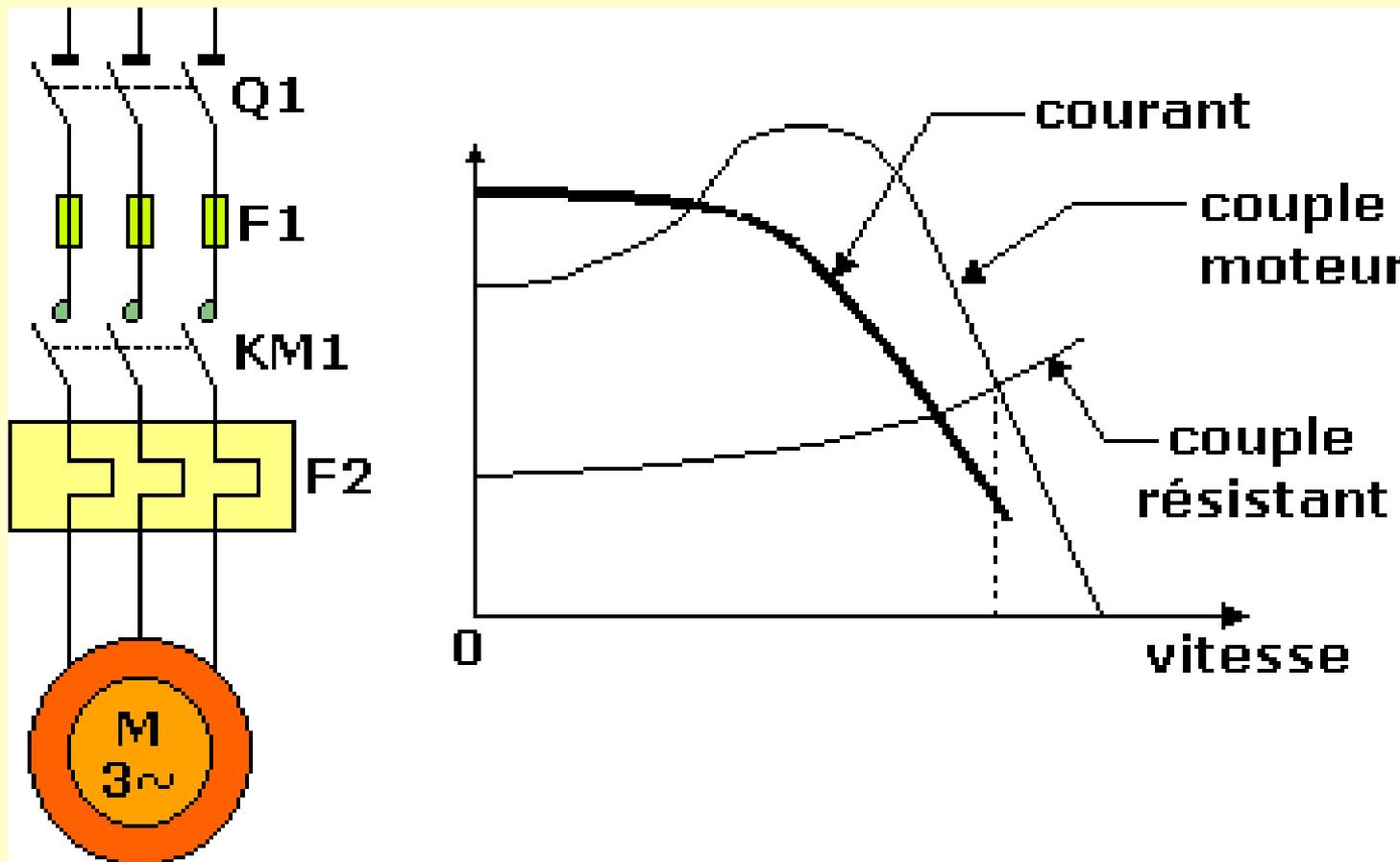




# Démarrage du moteur asynchrone

# Démarrage direct

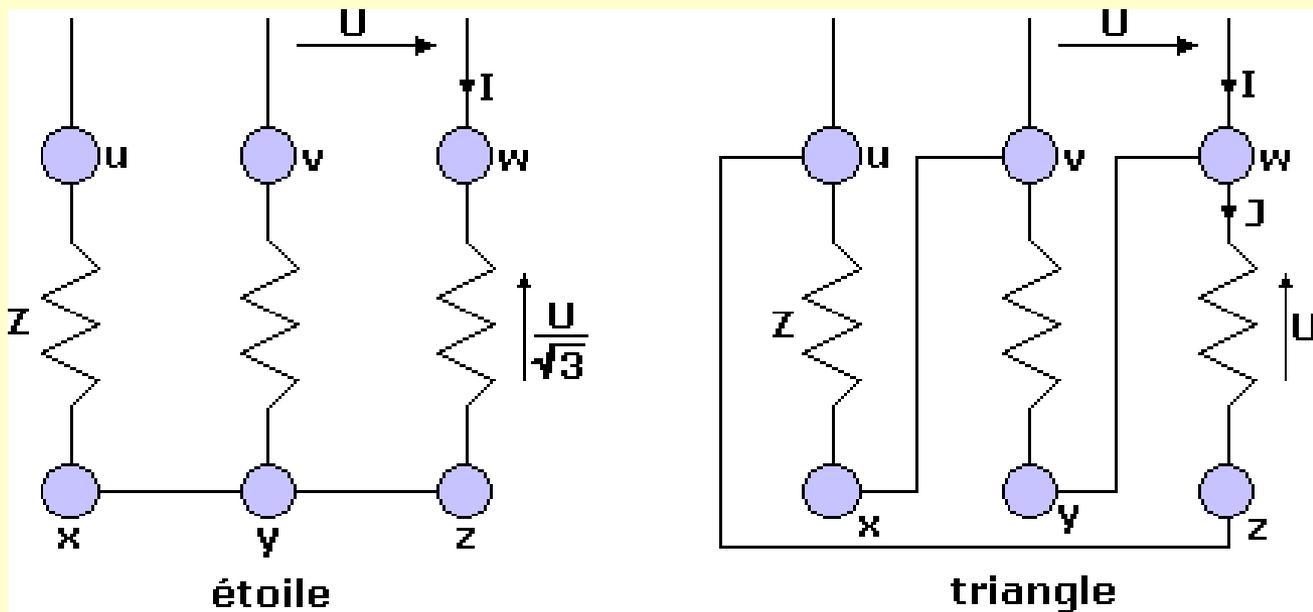
Ce type de démarrage est réservé aux moteurs de faible puissance devant celle du réseau, ne nécessitant pas une mise en vitesse progressive. Le couple est énergique, l'appel de courant est important ( 5 à 8 fois le courant nominal ).

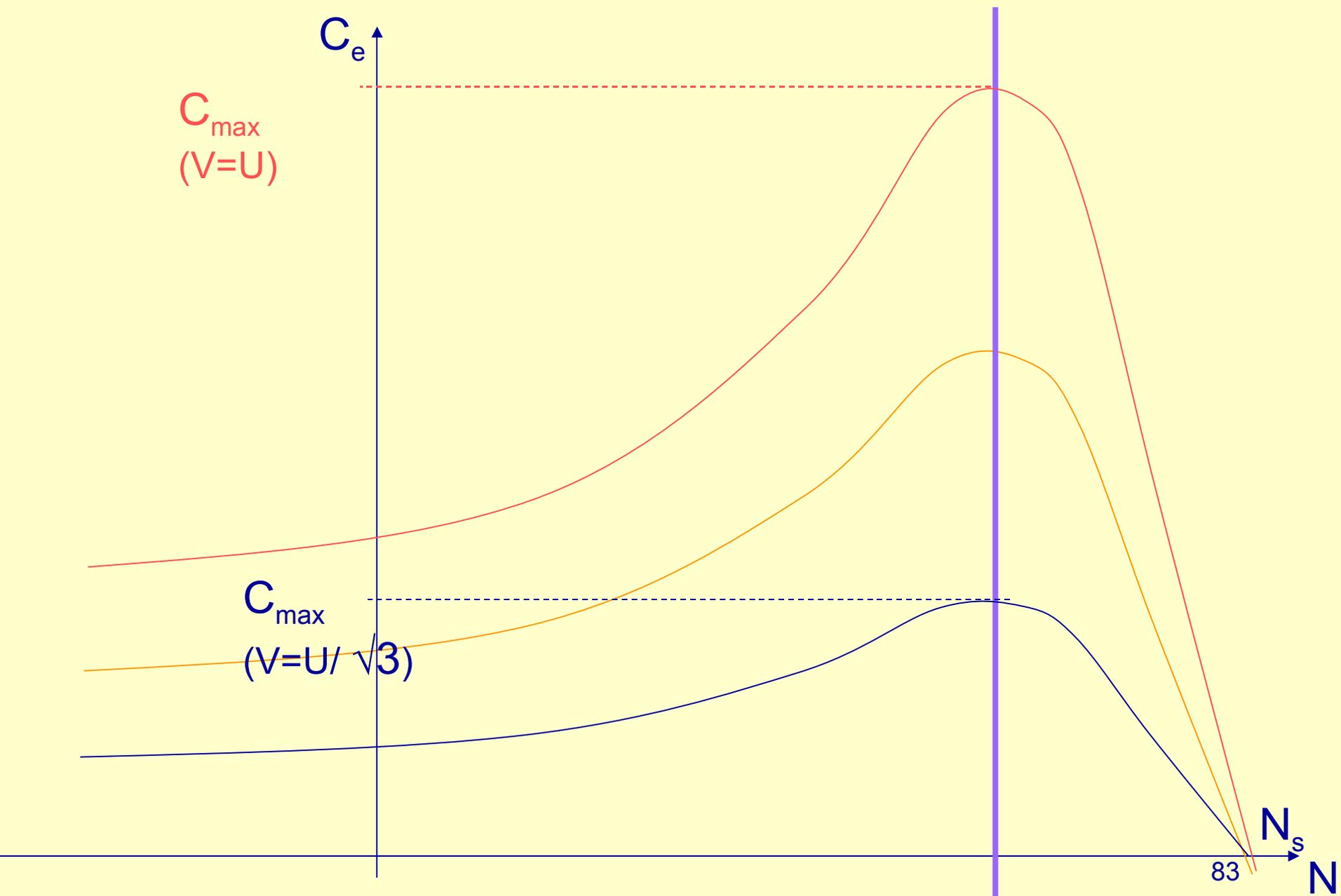


# Démarrage par réduction de la tension d'alimentation au stator

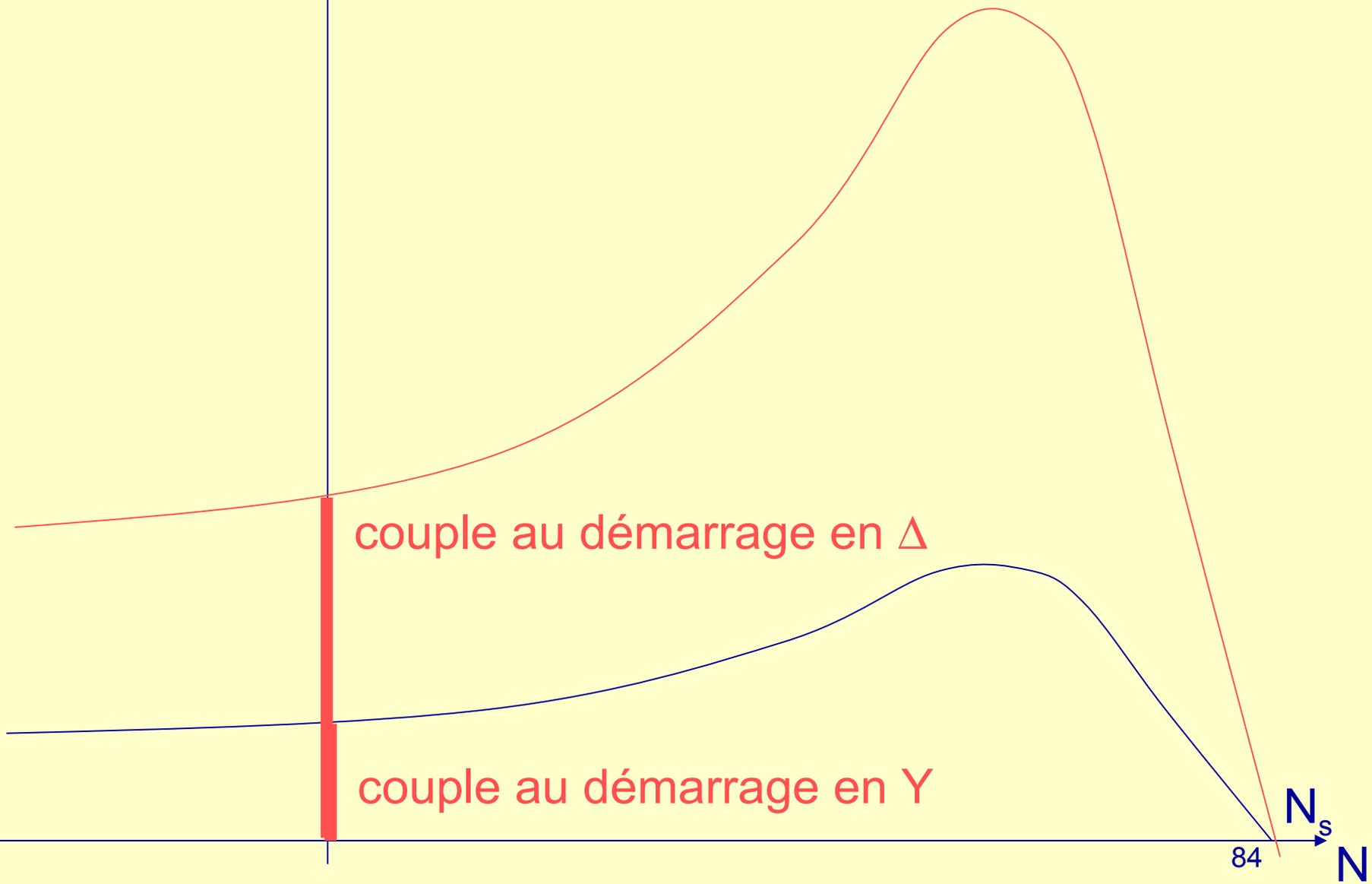
# Démarrage étoile triangle

Ce type de démarrage est réservé aux machines démarrant à vide ou dont le couple résistant est faible. L'intensité de démarrage est divisée par 3, mais le couple de démarrage aussi (proportionnel au carré de la tension d'alimentation des enroulements).





$C_e$

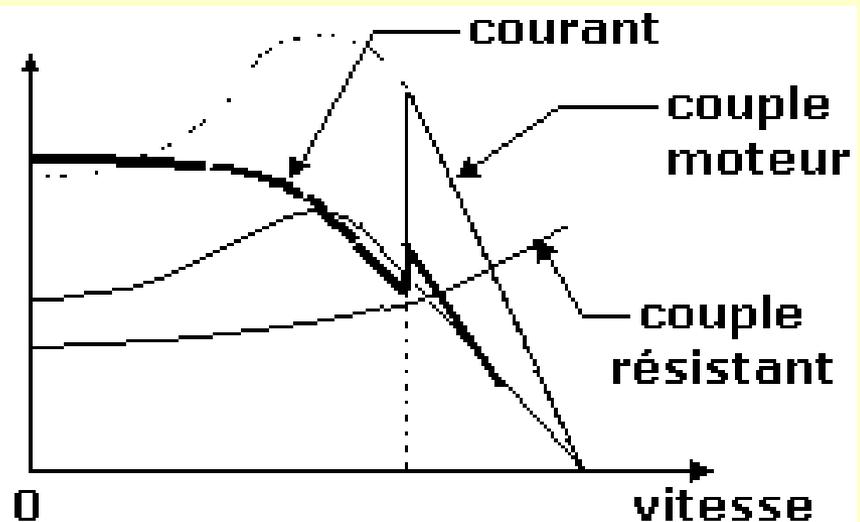
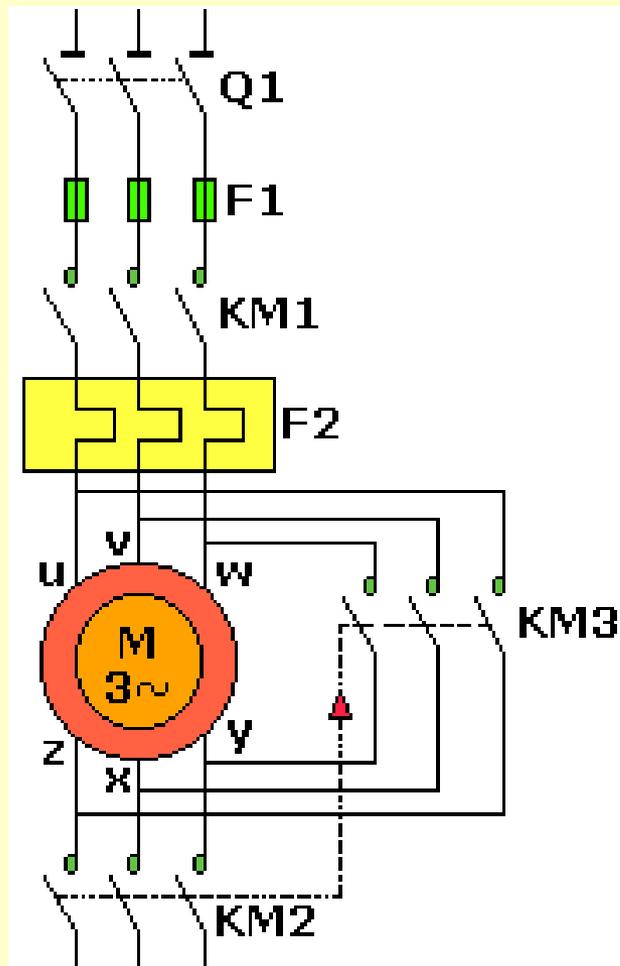


couple au démarrage en  $\Delta$

couple au démarrage en Y

84

$N_s$   
N

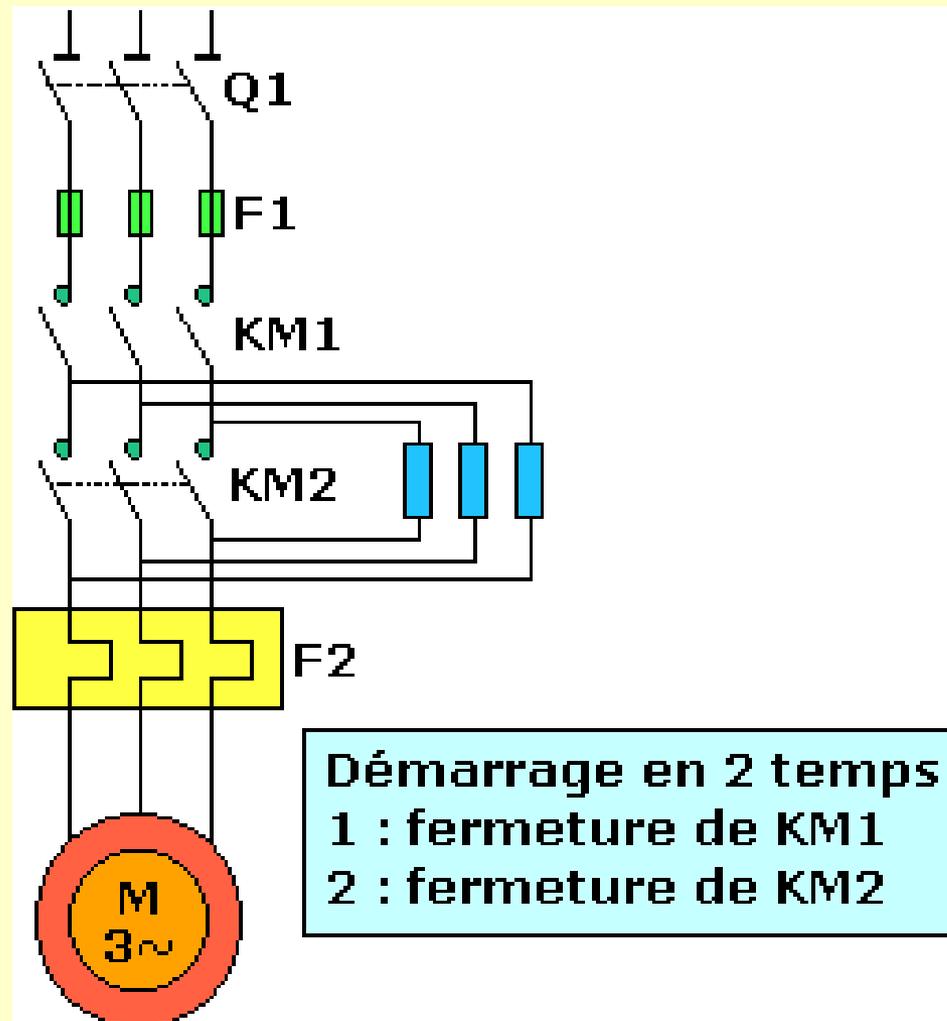


**Démarrage en 3 temps**  
 1 : fermeture de KM1 et KM2  
 2 : ouverture de KM2  
 3 : fermeture de KM3

Solution peu chère et performante convient aux moteurs à cage

# Démarrage par résistances statoriques

Ce type de démarrage a des caractéristiques comparables au démarrage étoile-triangle. Il n'y a pas de coupure de l'alimentation du moteur entre les deux temps de démarrage.



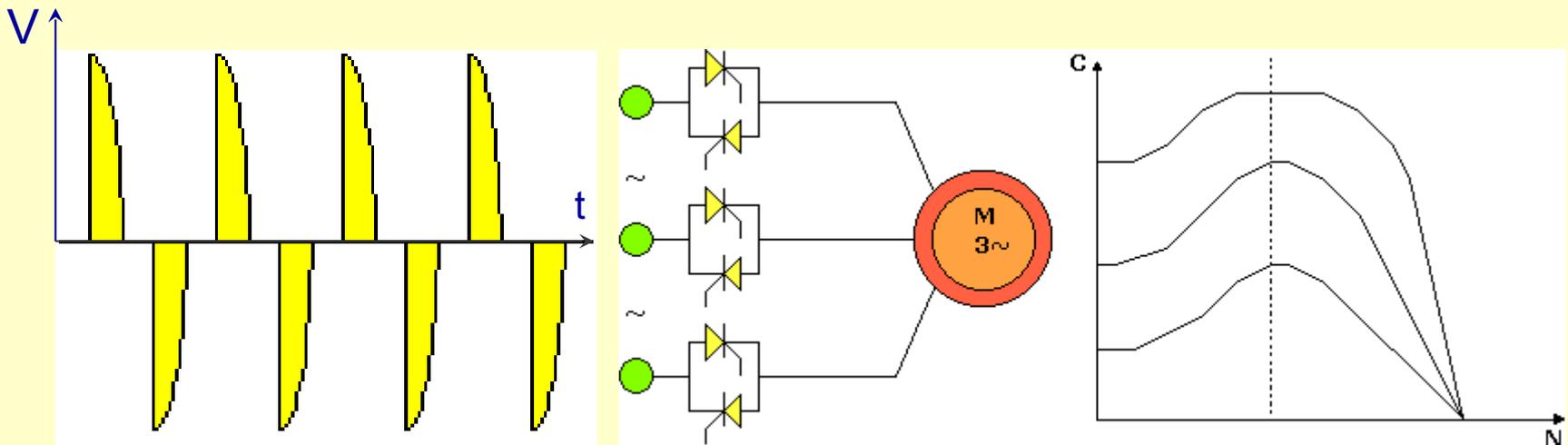
# Démarrage par démarreur électronique

# Principe

On utilise un gradateur par déphasage (à angle de phase)

Il fournit une tension alternative, de valeur efficace variable et de fréquence fixe (celle du réseau) par modulation de l'angle d'amorçage des semi-conducteurs (thyristors, triacs).

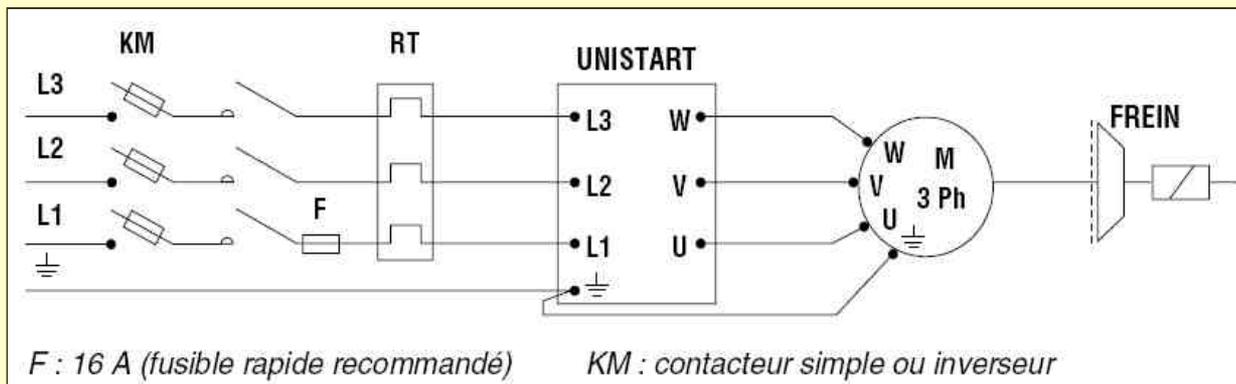
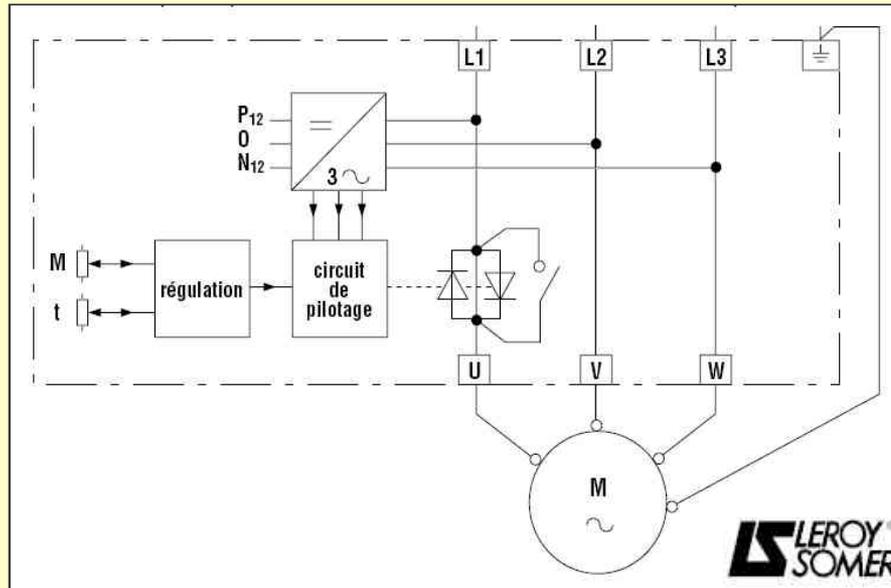
Allure des signaux : (en monophasé)



Solution chère convient à tous type de moteur

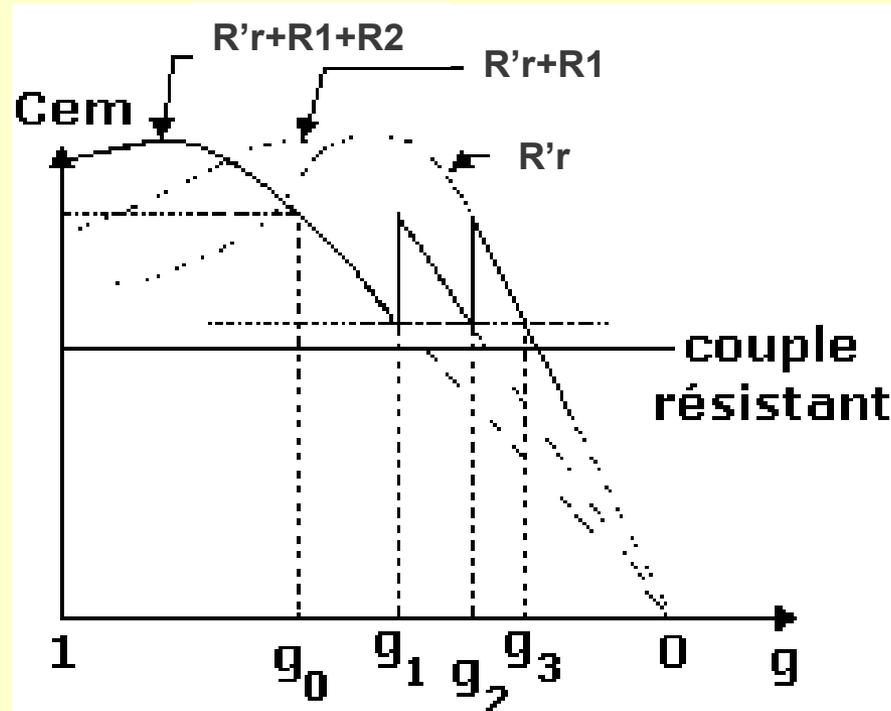
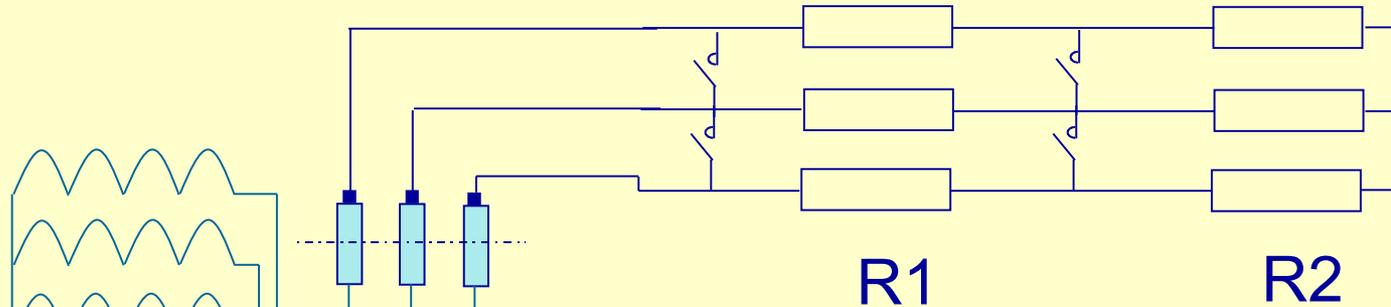
attention à l'application car  $C_d$  est fortement diminué

On impose ,au démarrage, une rampe de tension réglable ou un courant maximum pendant la phase d'alimentation du moteur. Lorsque la tension nominale est atteinte, un relais interne courtcircuite l'électronique de puissance et le moteur retrouve ses caractéristiques nominales.



# Démarrage par résistances rotoriques

Le couple ne dépend que du rapport  $R_{\text{total}}/g$  que l'on modifie en fonction du temps.



# Freinage du moteur asynchrone

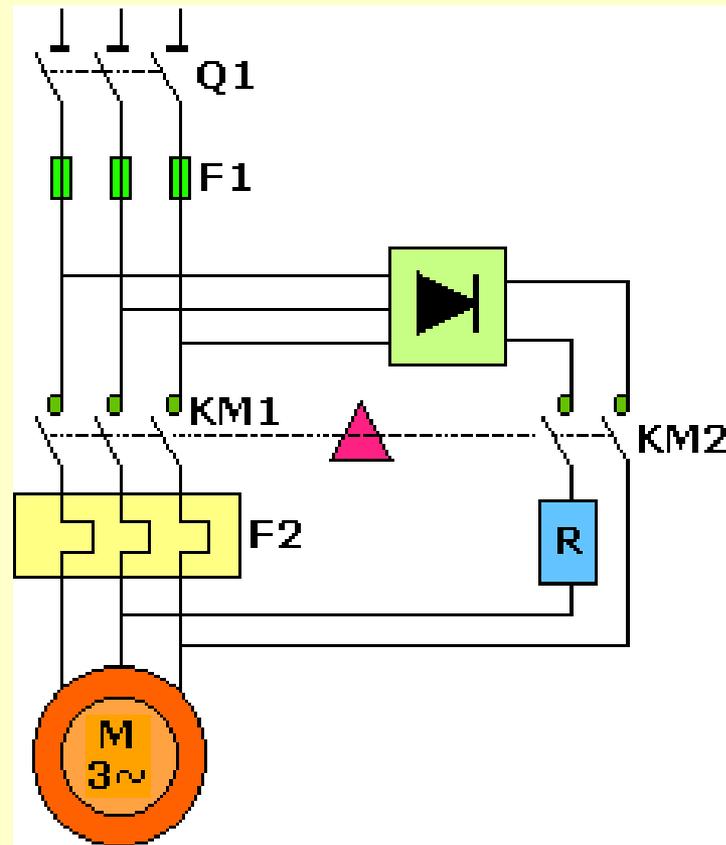
Lors de l'arrêt d'une machine, il est souvent nécessaire de réduire le temps de décélération dû à la seule inertie des parties tournantes.

Le freinage électrique offre l'avantage de ne mettre en œuvre **aucune pièce d'usure**.

Dans certains cas, l'énergie mécanique récupérée peut être réinjectée sur le réseau électrique.

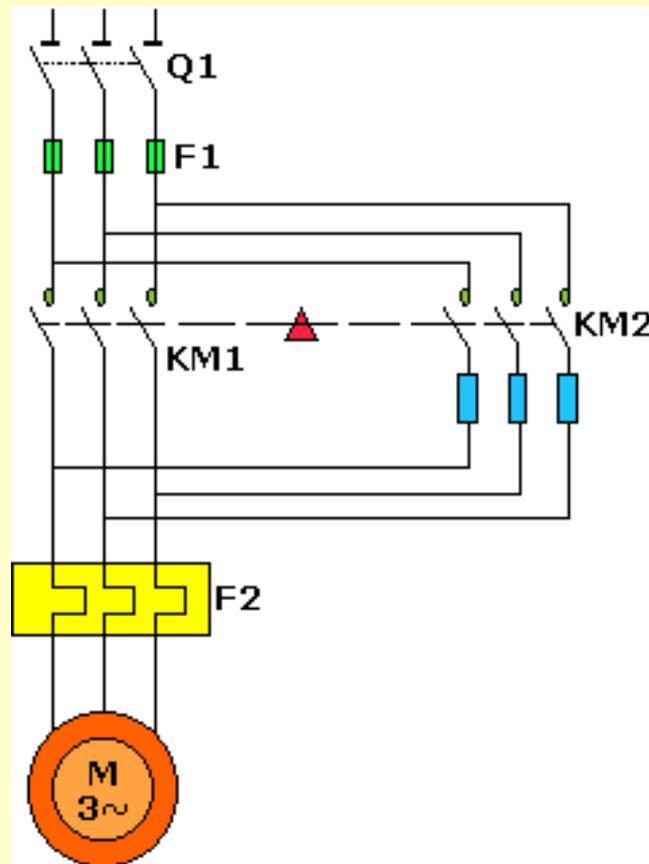
# Freinage par injection de courant continu

Au moment du freinage, KM1 s'ouvre puis KM2 se ferme. Un courant continu est envoyé dans le stator. Le moteur se comporte comme un alternateur dont l'inducteur est constitué par le stator, l'induit par le rotor en court - circuit.



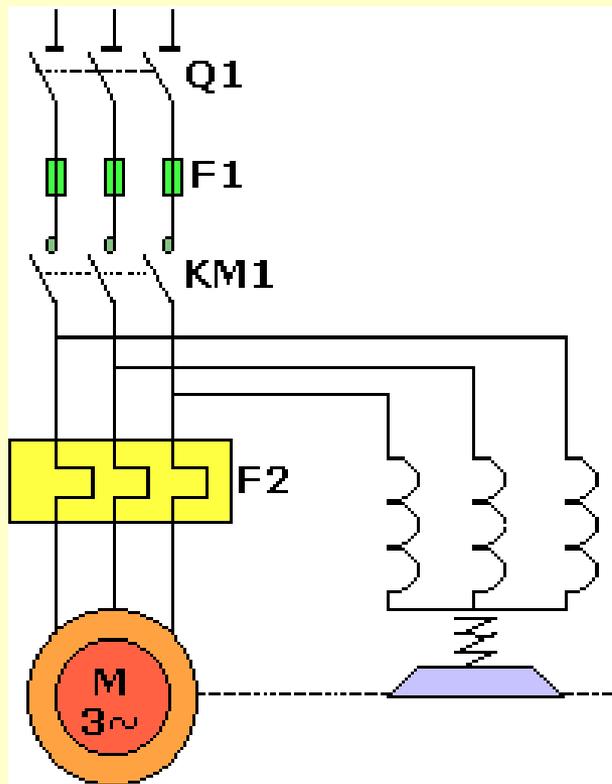
# Freinage par contre courant

Lors du freinage, il y a ouverture de KM1 puis fermeture de KM2 : le moteur est alimenté par un champ statorique inverse. Les pointes de courant sont très importantes et il est conseillé d'insérer un jeu de résistances pour limiter ce courant. KM2 doit s'ouvrir dès l'arrêt du moteur, pour éviter un redémarrage en sens inverse : il est donc nécessaire de prévoir un capteur détectant l'absence de rotation (capteur centrifuge).



# Moteur frein

Le moteur est muni d'un frein électromagnétique à disque monté du côté opposé à l'arbre de sortie. En l'absence de courant (ouverture de KM1 ou coupure du réseau), un ressort de rappel permet d'assurer le freinage. C'est un élément important de sécurité, en particulier dans les applications de levage.



# Bibliographie

Polycopié Machine à induction (asynchrone) Eric Semail ENSAM LILLE

[www.stielec.ac-aix-marseille.fr](http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr) Démarrage et freinage des MAS triphasés Patrick ABATI

Ecole nationale de la marine marchande MARSEILLE présentation MAS de CHEVASSU

**FIN**