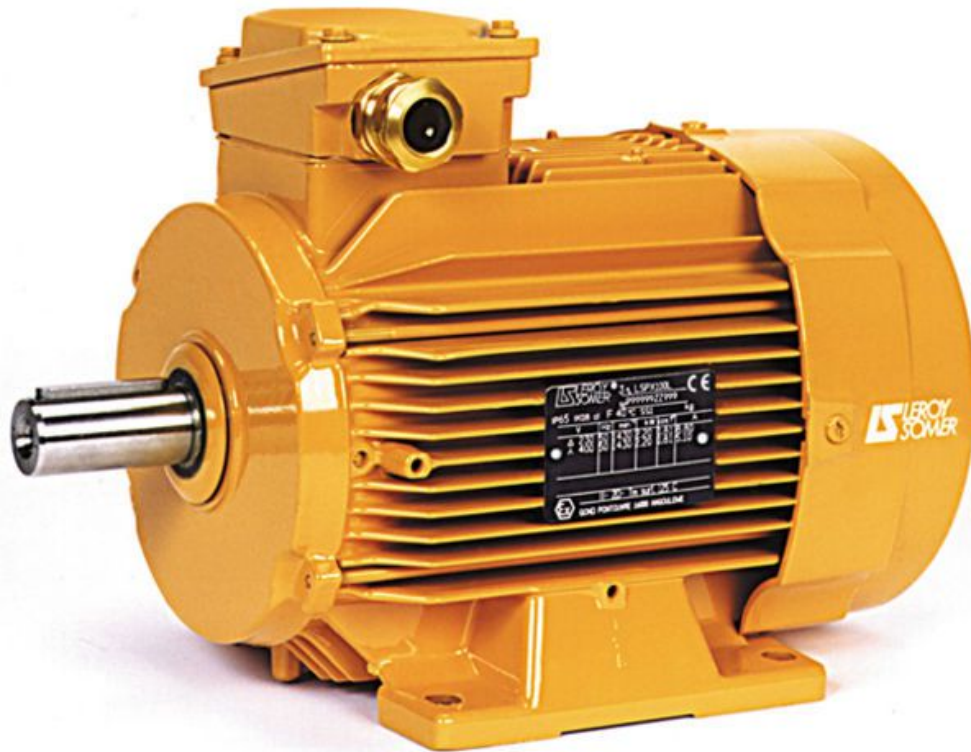


ELECTROTECHNIQUE

Chapitre 4 : Machine asynchrone triphasée

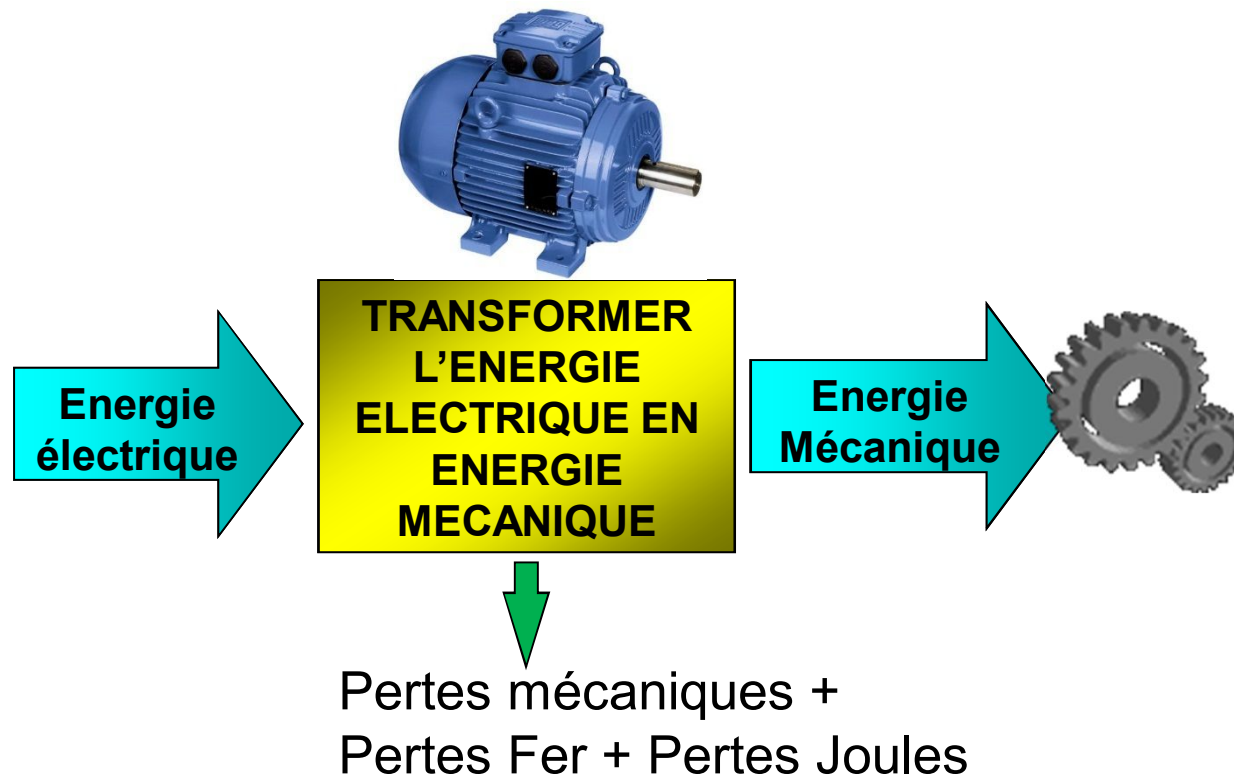


M'hammed Guisser
CRMEF-Casa-Settat

Machine asynchrone triphasée

Introduction:

- La machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur (ou moteur d'induction) dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts;
- La machine asynchrone (MAS) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement;





Machine asynchrone triphasée

- 80% des moteurs électriques sont des moteurs asynchrones, sont employés les plus fréquents dans l'industrie;
- Ils possèdent en effet plusieurs avantages: simplicité de construction, robustesse, prix peu élevé et entretien facile.

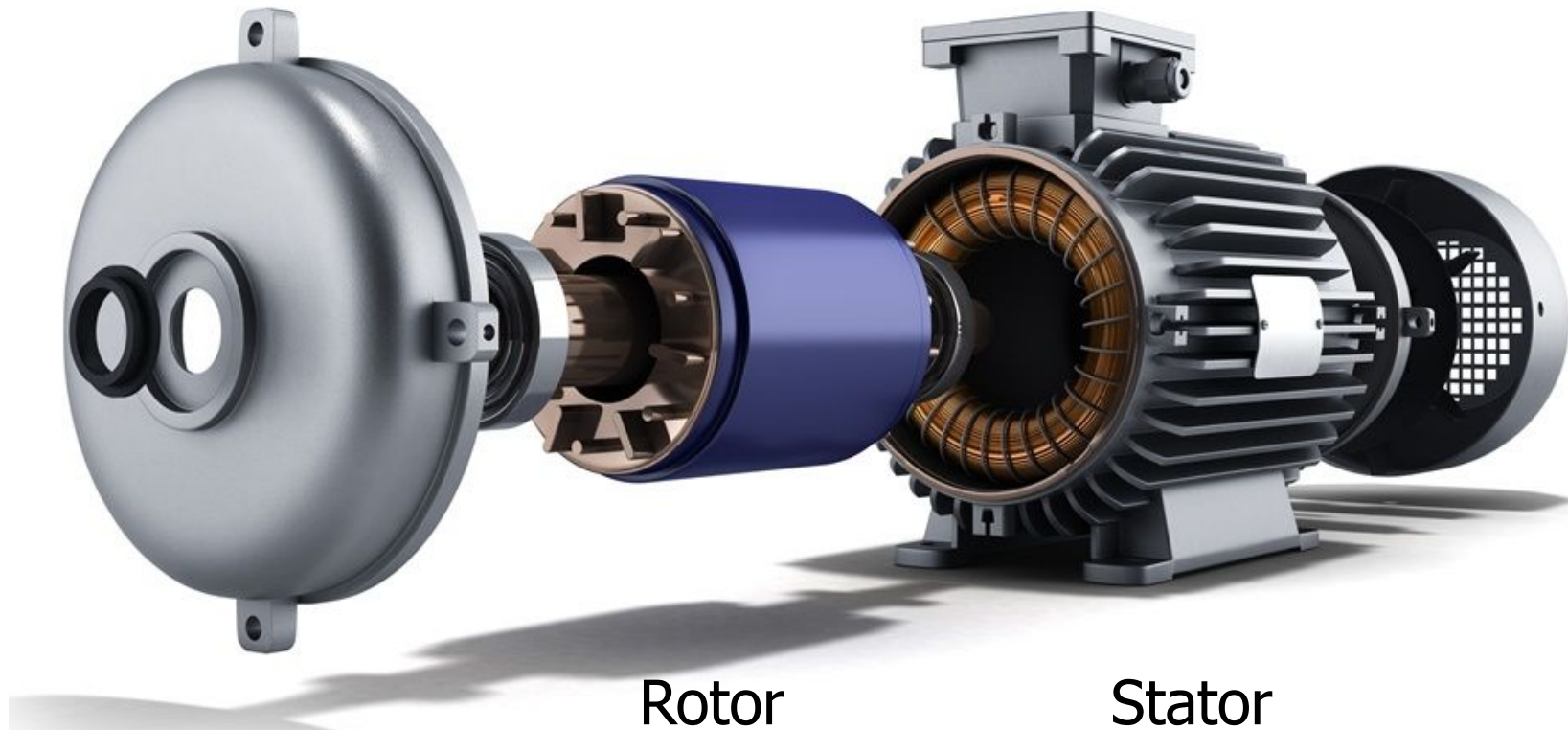
Le développement de l'électronique de puissance fait que la machine asynchrone est maintenant utilisée dans des domaines très variés:

- Transport (TGV, tramways, voitures électriques),
- Industrie (machines outils),
- Électroménager,
- Pompes, convoyeurs, élévateurs,
- De plus en plus utilisée en génératrice pour la production d'énergie (éolienne)...

Machine asynchrone triphasée

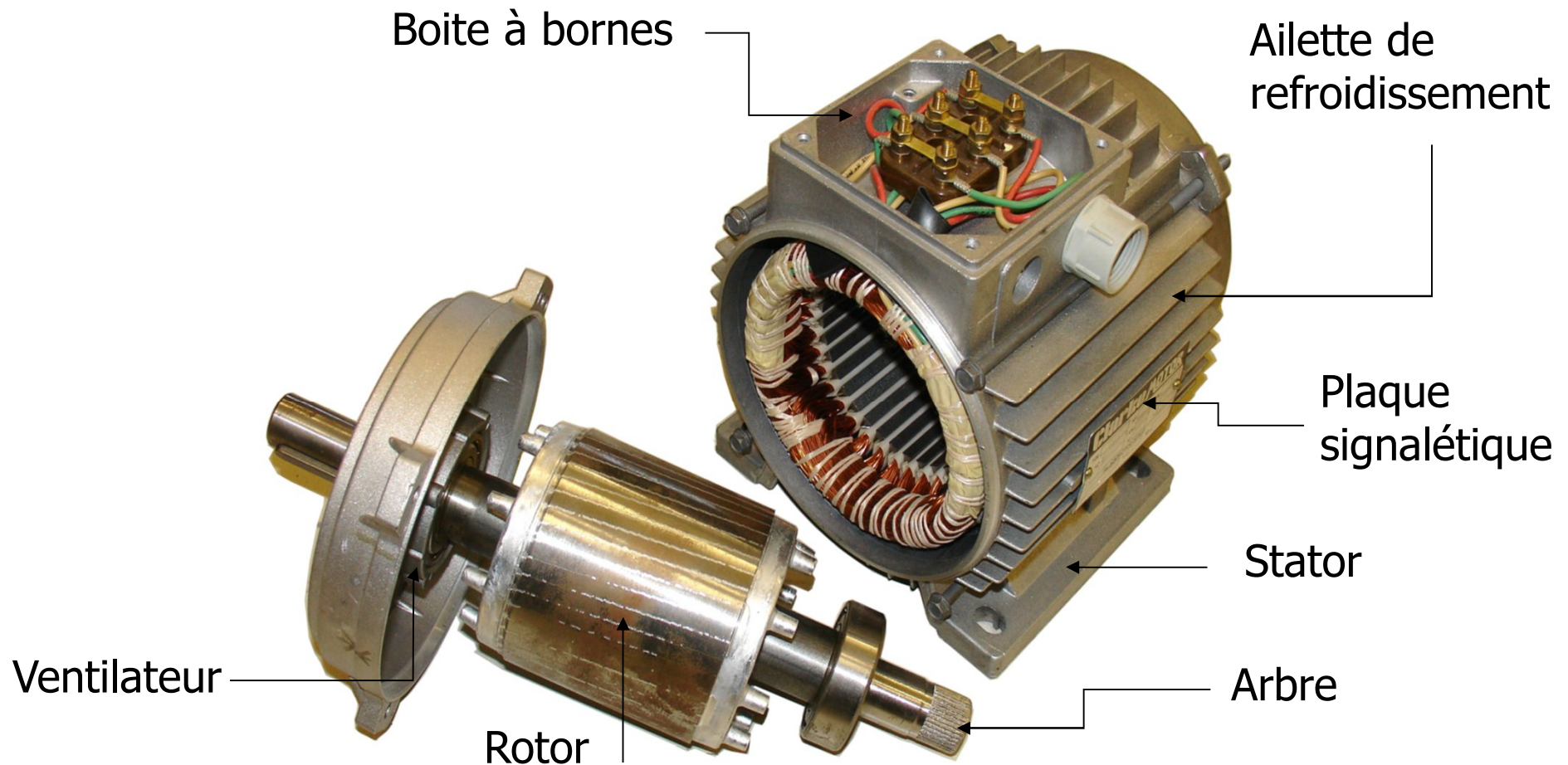
1. Constituant:

- La machine asynchrone triphasée comprend deux parties principales:
- un inducteur fixe nommé **stator**
- et un induit mobile nommé **rotor**.



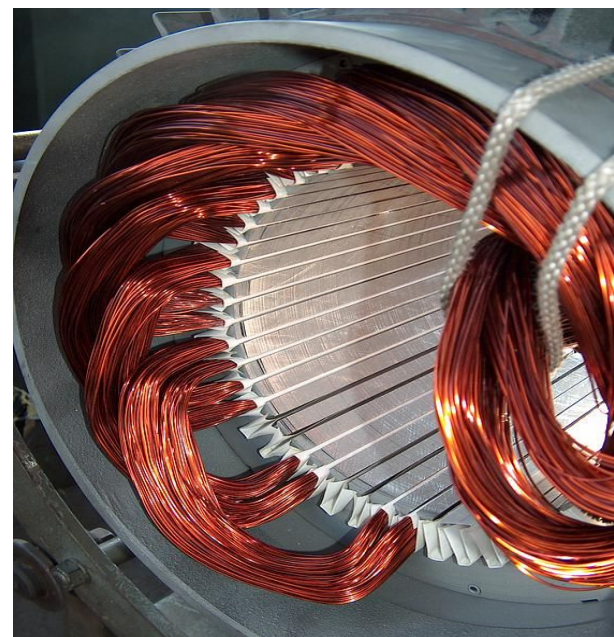
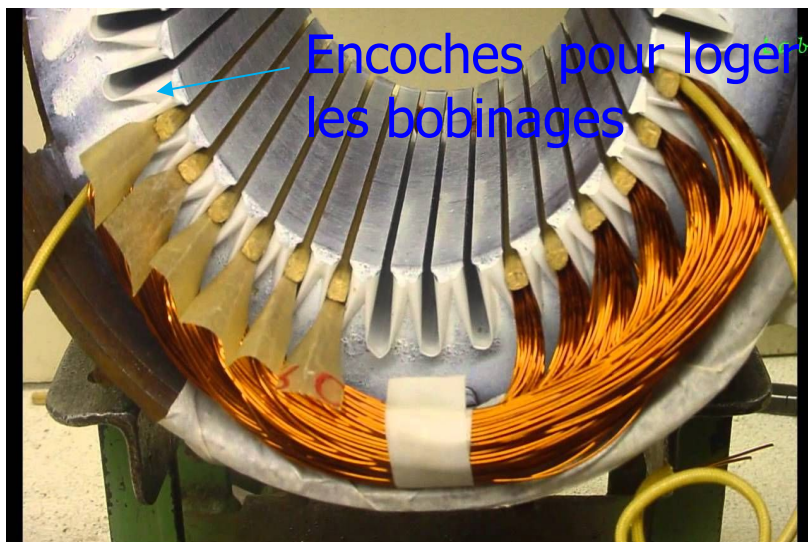
Machine asynchrone triphasée

- Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles magnétiques pour éviter la circulation de courants de Foucault.



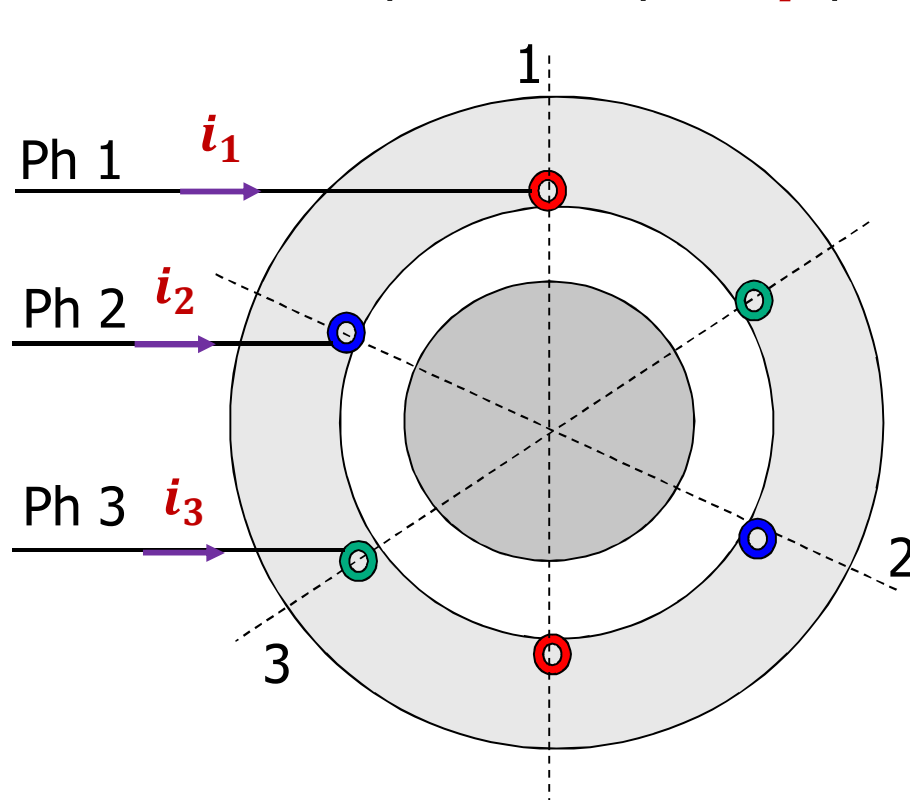
Machine asynchrone triphasée

Le stator:

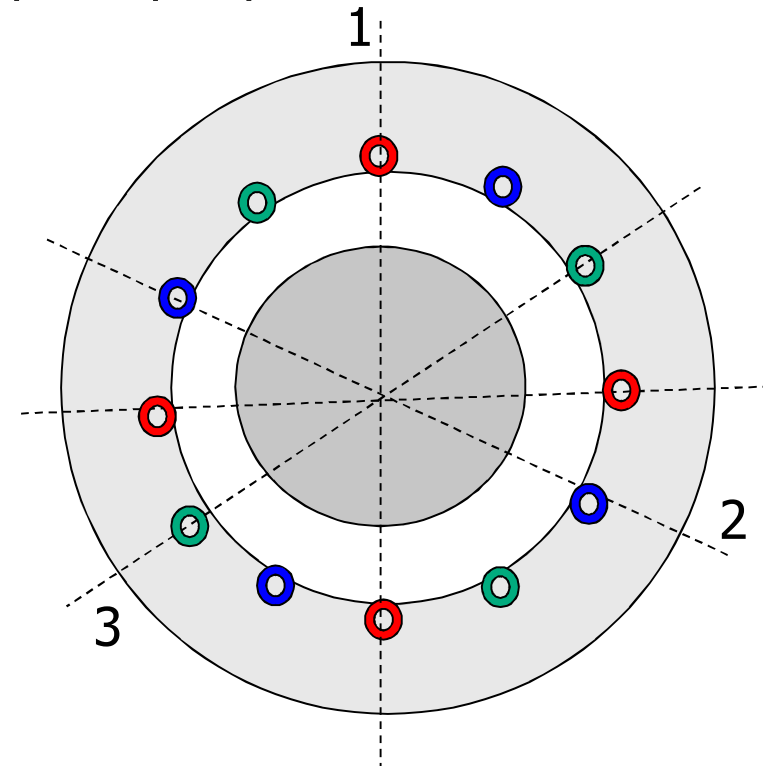


Machine asynchrone triphasée

- Le stator porte trois bobinages (décalés géométriquement de 120°) qui peuvent être couplés en étoile ou en triangles selon le réseau; d'alimentation par l'intermédiaire de la plaque à bornes de la machine.
- Les enroulements sont réparties dans les encoches du stator;
- Un stator triphasé comporte p paires de pôles par phase.



Stator à 1 paire de pôle $p = 1$
(Une bobine par phase)



Stator à 2 paires de pôles $p = 2$
(deux bobines en série par phase)

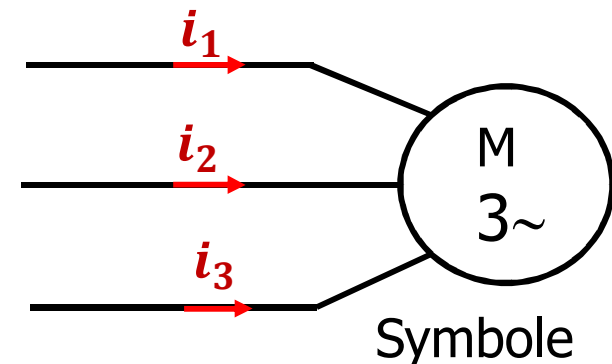
Machine asynchrone triphasée

Le rotor:

- De forme cylindrique, il porte soit un bobinage triphasé accessible par trois bagues et trois balais soit une cage d'écurueil non accessible à base de barres conductrice en aluminium ou en cuivre situées dans des encoches.
- Le circuit rotorique est mis en court-circuit (par des anneaux pour le rotor à cage ou un rhéostat pour le rotor bobiné).
- Le rotor est séparé du stator par un entrefer constant très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement.

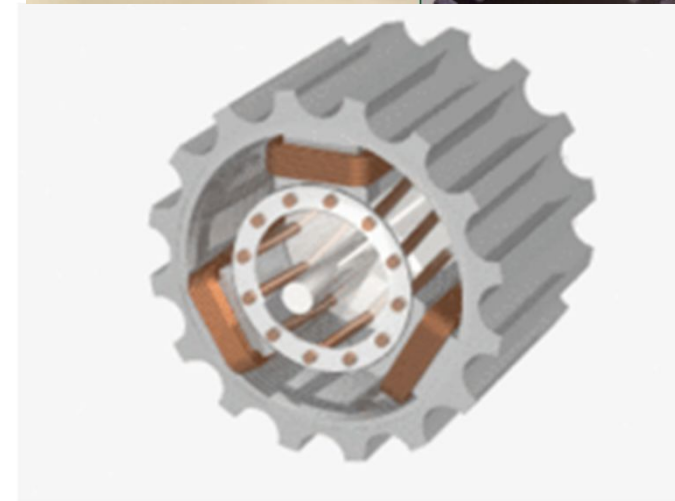
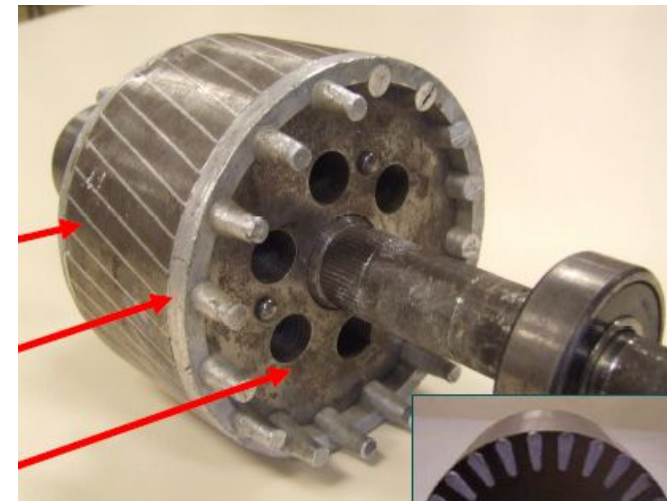
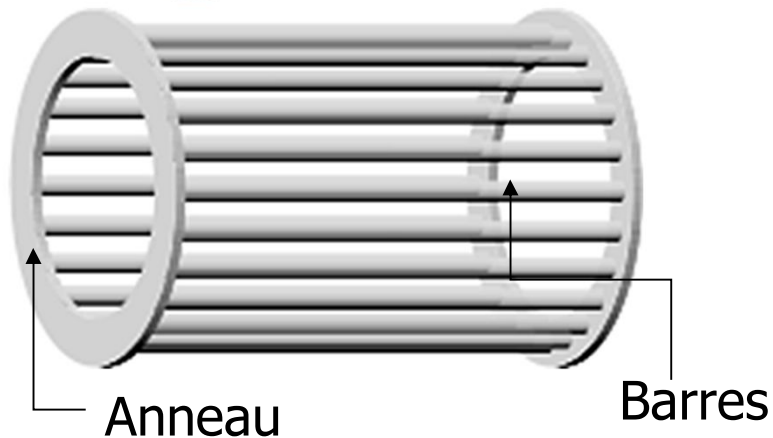
□ Rotor à cage d'écurueil:

- Les moteurs à cage ont l'avantage d'être robuste et de coût beaucoup plus faible et sont les plus répandus dans les applications industrielles;
- Ils présentent l'inconvénient qui est l'impossibilité de faire varier la résistance du rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrages directes avec la tension du réseau.
- Mais l'utilisation des démarreurs électroniques assure la fonction de démarrage avec un appel de courant admissible.



Machine asynchrone triphasée

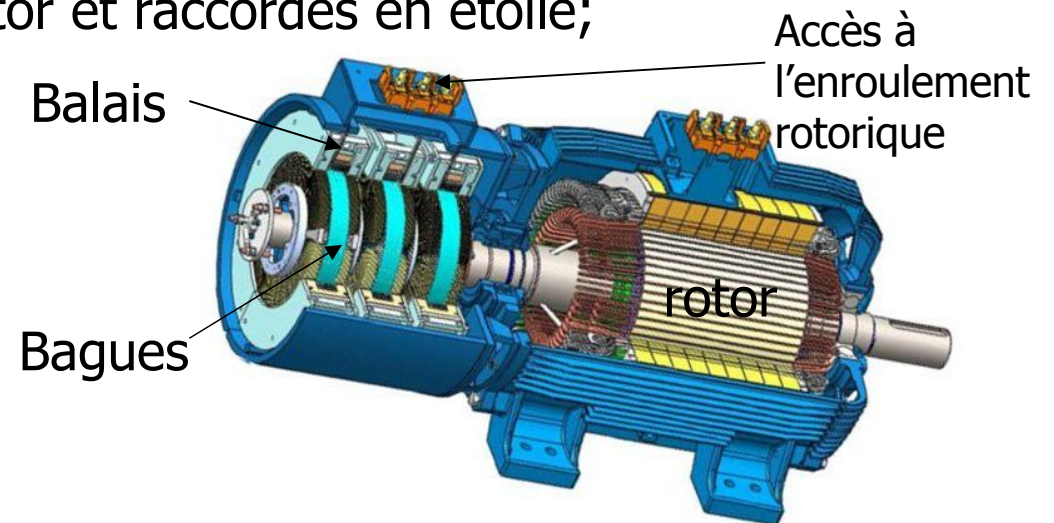
- Les barres placées longitudinalement logées dans des encoches sont court-circuitées par deux anneaux à leurs extrémités. Il n'y a aucun moyen de faire des mesures électriques sur le rotor;
- Le courant induit dans le rotor passe par une barre revient par la barre situé à une distance polaire.



Machine asynchrone triphasée

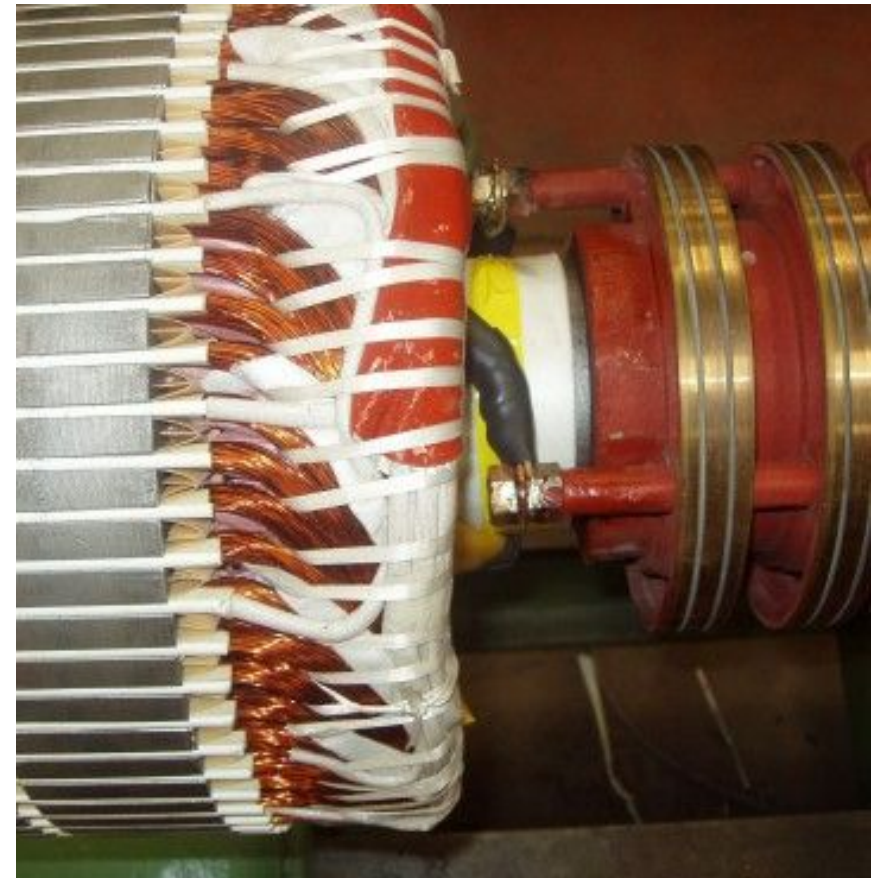
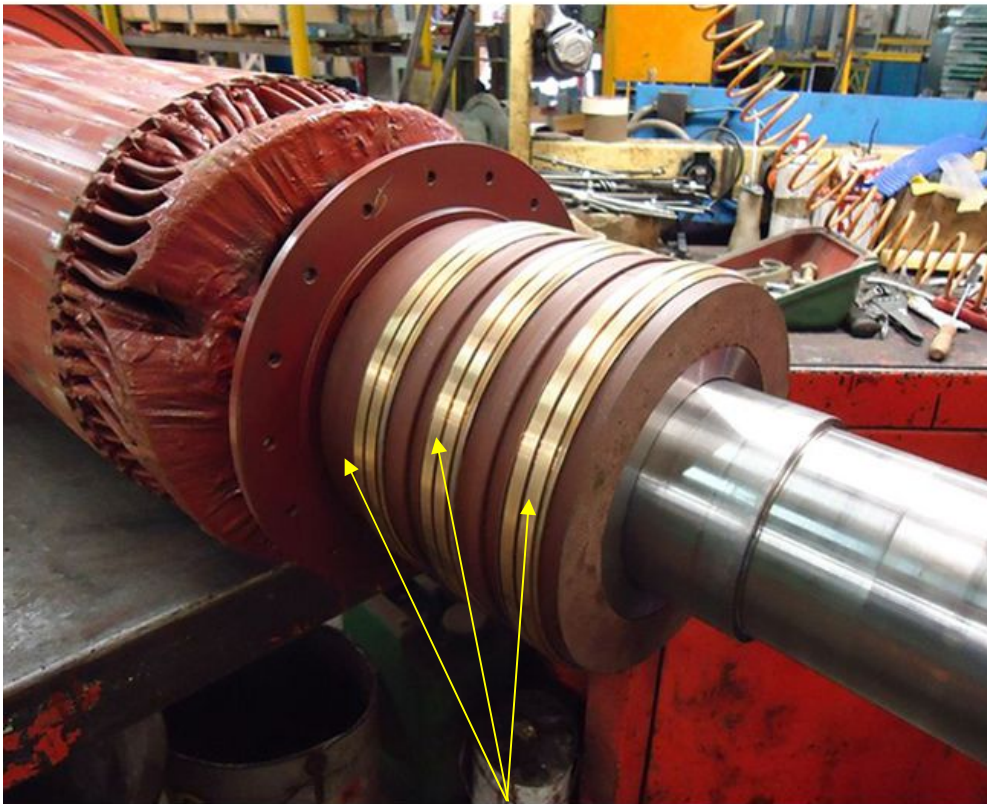
□ Rotor bobiné:

- Composé de trois enroulements de p paires de pôles logés dans des encoches à la périphérie du rotor et raccordés en étoile;
- L'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre;



Machine asynchrone triphasée

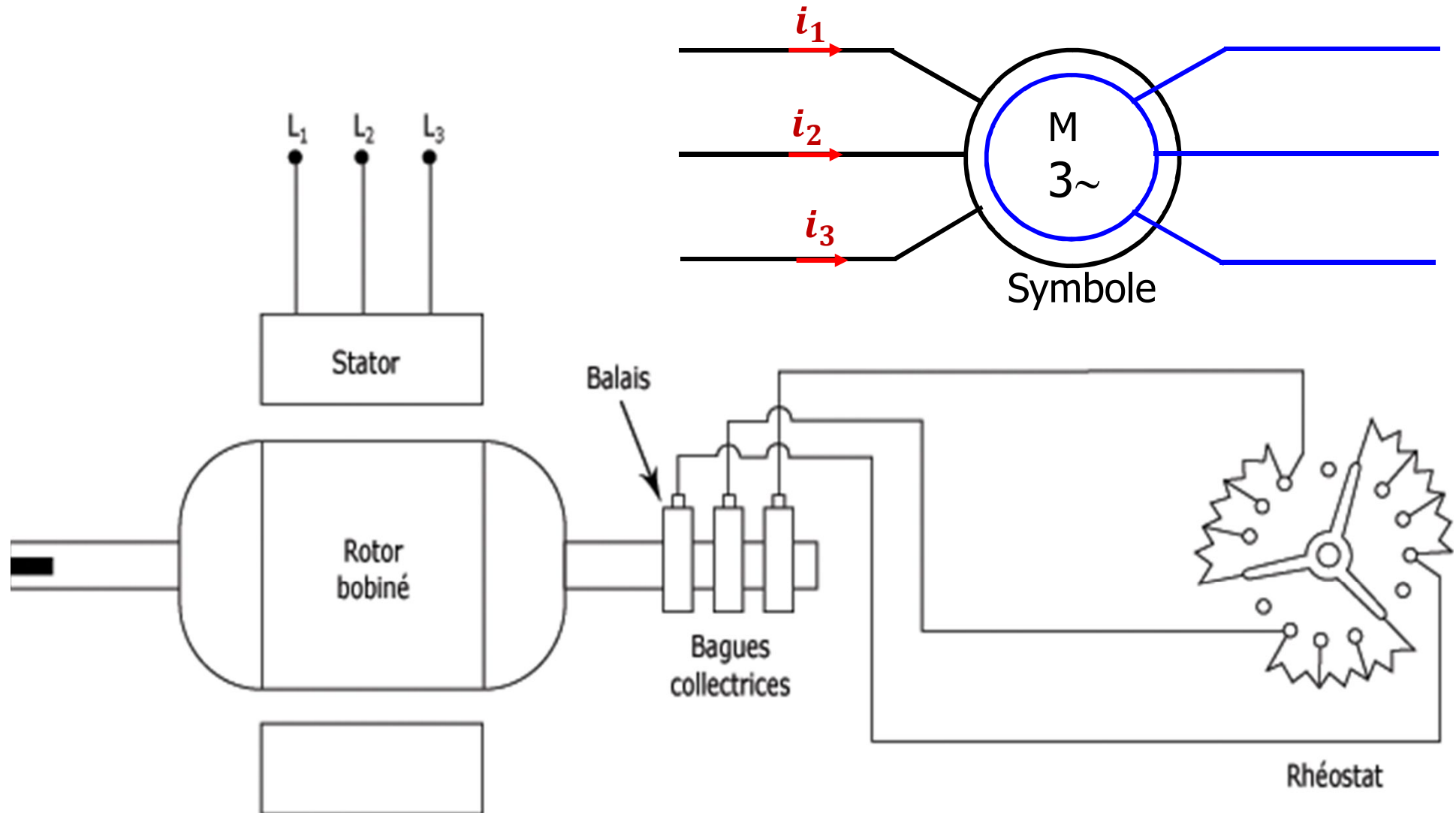
- Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités (de l'extérieur par un rhéostat). Il est possible de faire des mesures électriques au rotor.



les trois bagues de l'arbre moteur de connexion à la partie fixe

Machine asynchrone triphasée

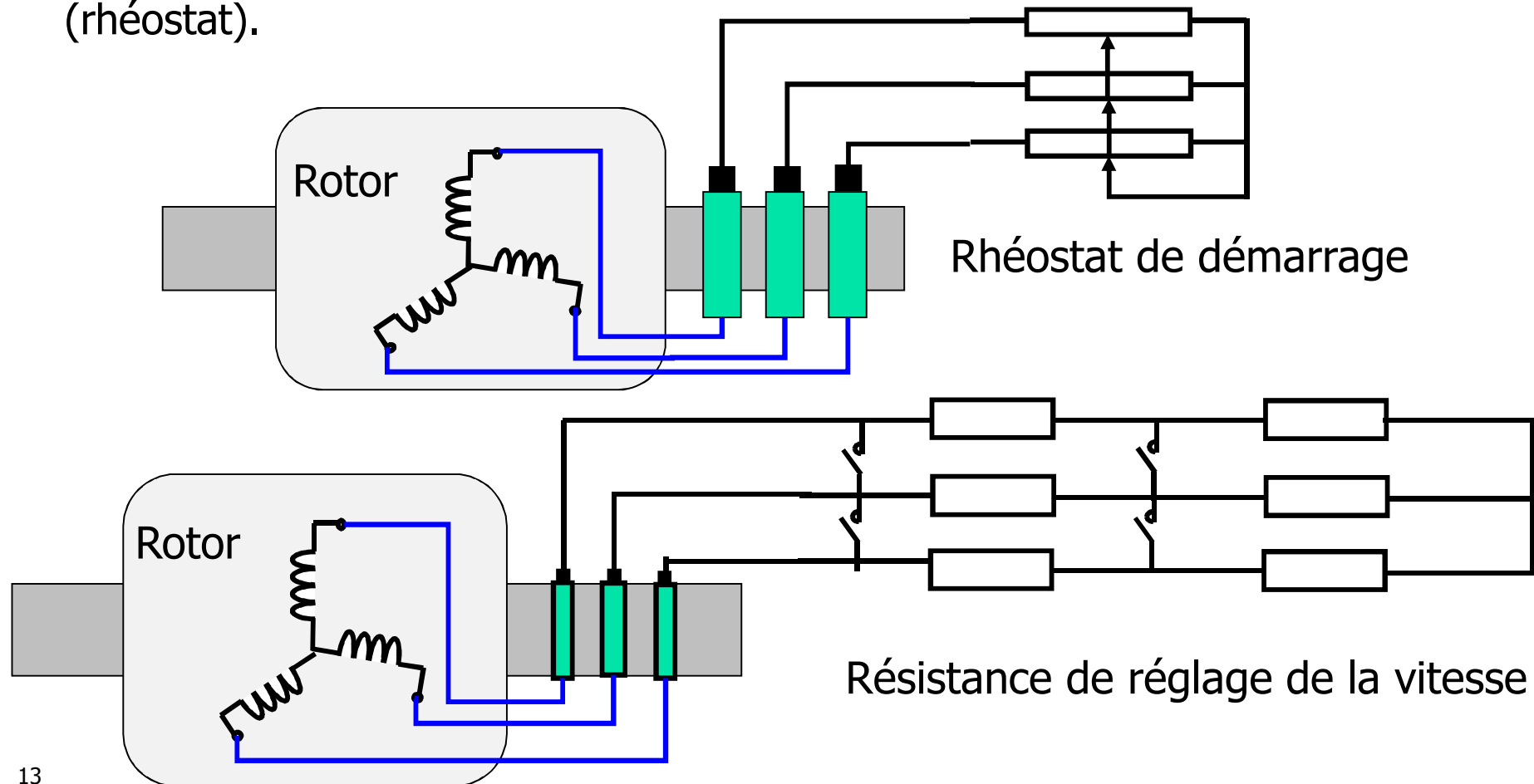
- Les moteurs asynchrones à rotor bobiné (à bagues) sont utilisés pour certaines applications de forte puissance dans l'industrie.



Machine asynchrone triphasée

Les machines à rotors bobinés sont plus coûteuses à réaliser et entretenir que les machines dont le rotor est à cage. Cependant, il présentent les avantages suivants:

- Le couple de démarrage est plus élevé; Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat;
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostat).



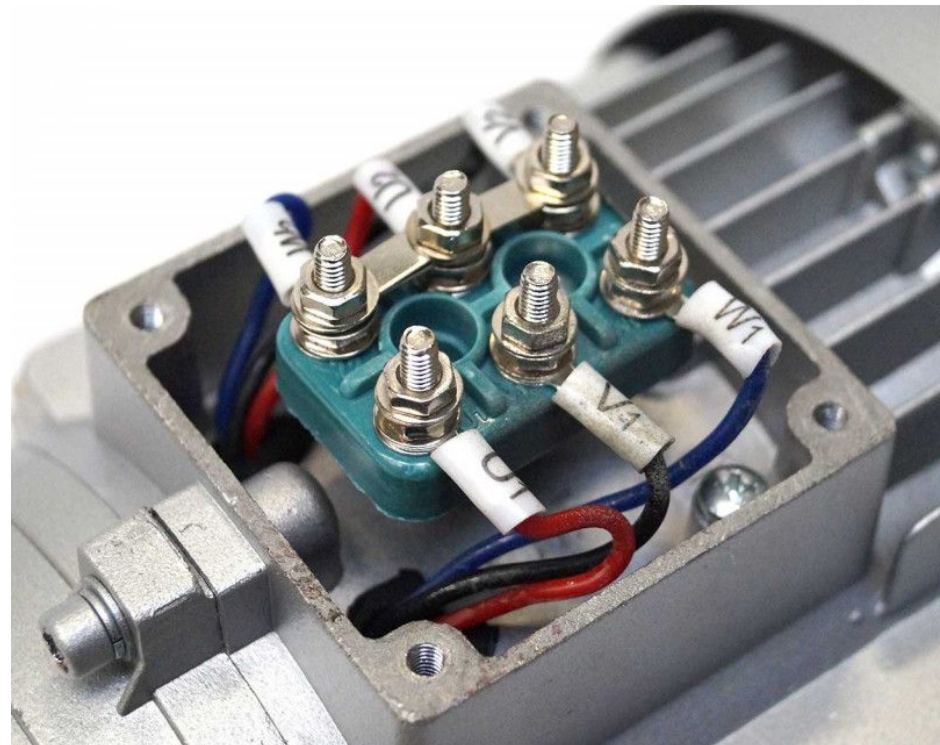
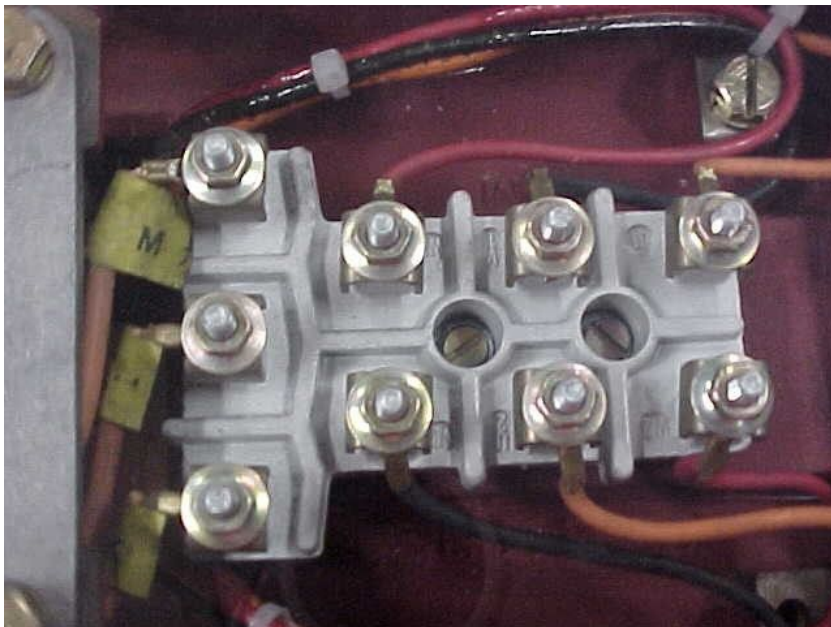
Machine asynchrone triphasée

□ Couplage du moteur au réseau:

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé comporte trois enroulements identiques, qui sont couplés: Soit en étoile (Y); Soit en triangle (Δ).

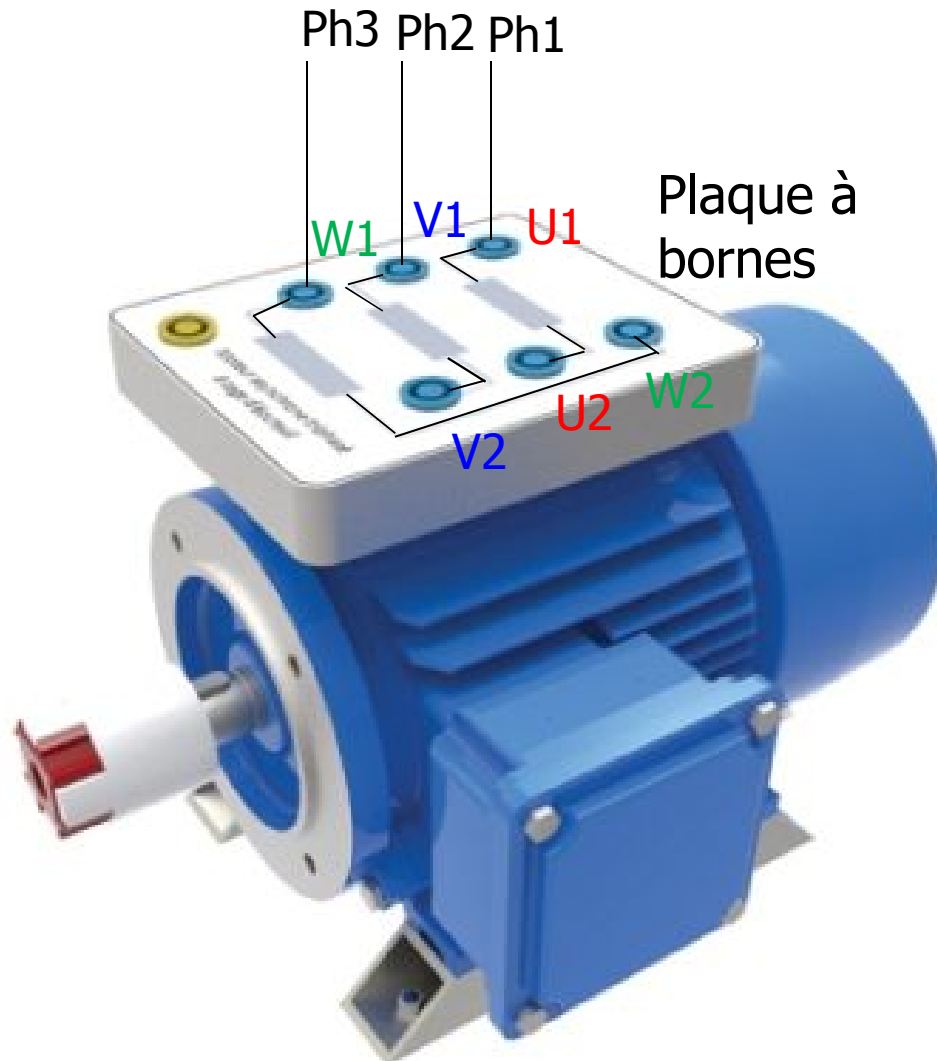
Choix du couplage:

- Il est choisi en fonction de la tension nominale de l'enroulement indiquée sur la plaque signalétique et de la tension du réseau d'alimentation;
- L'utilisateur choisit le couplage qui convient par l'intermédiaires de la plaque à bornes.

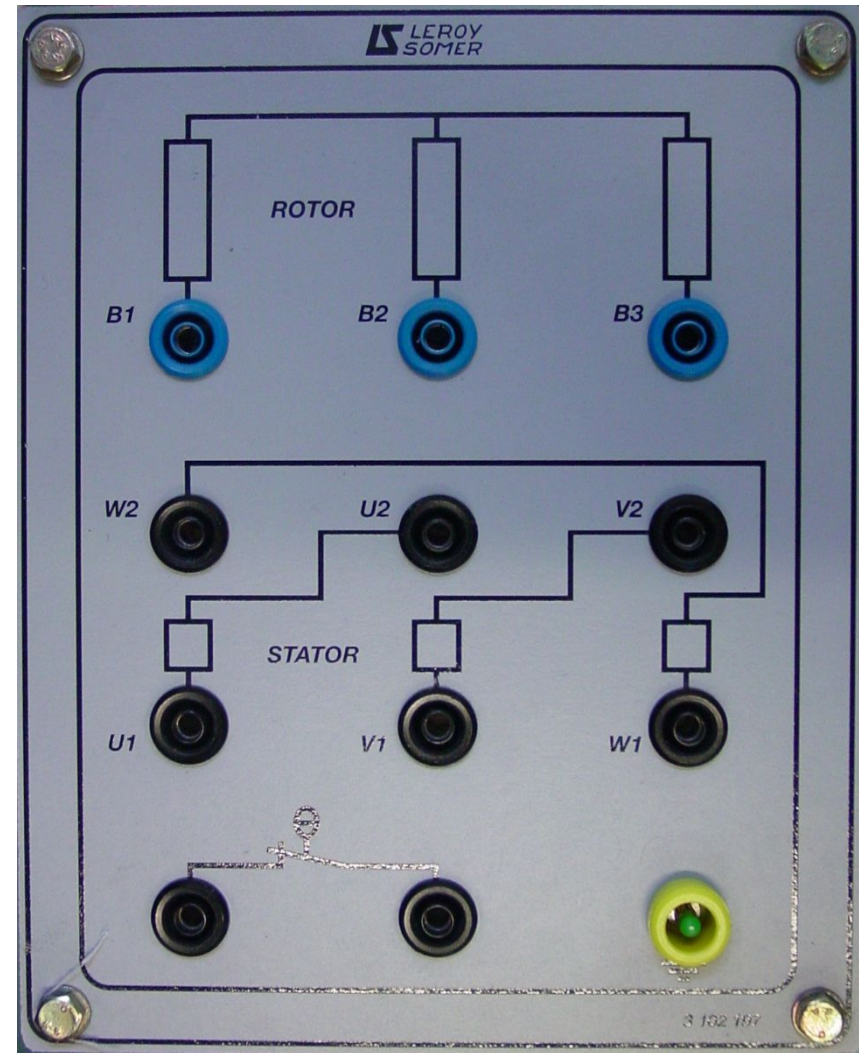


Machine asynchrone triphasée

Normalisation des bornes: Entrées U1, V1 et W1. Sorties: U2, V2 et W3



Rotor à cage



Rotor bobiné (3 bornes accessibles pour le rotor)

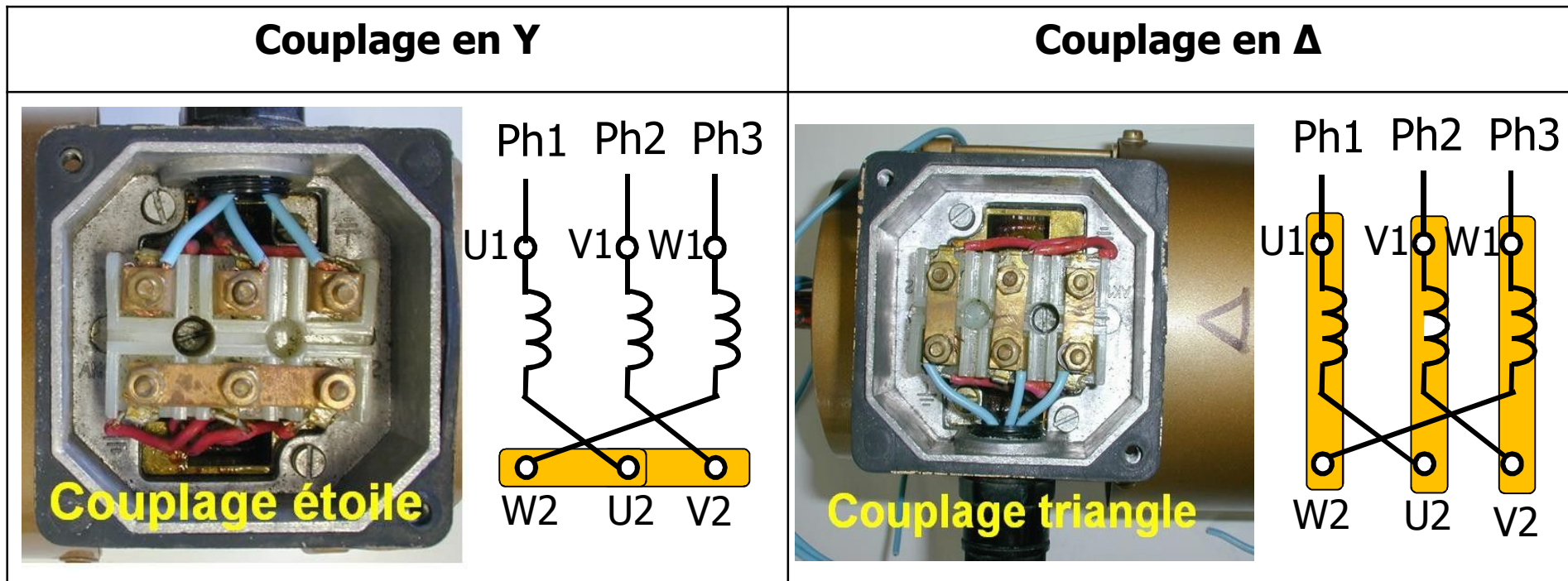
Machine asynchrone triphasée

La tension nominale aux bornes d'un enroulement statorique est la plus petite des deux tensions portées sur la plaque signalétique. Elle correspond à:

- La tension simple du réseau pour un couplage en **étoile**,
- La tension composée du réseau pour un couplage en **triangle**.

Exemple: un moteur Δ 220V/380V Y

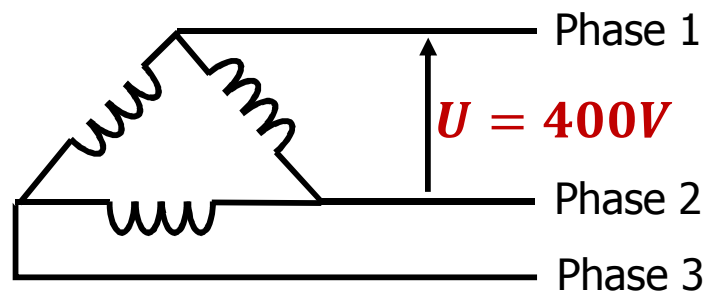
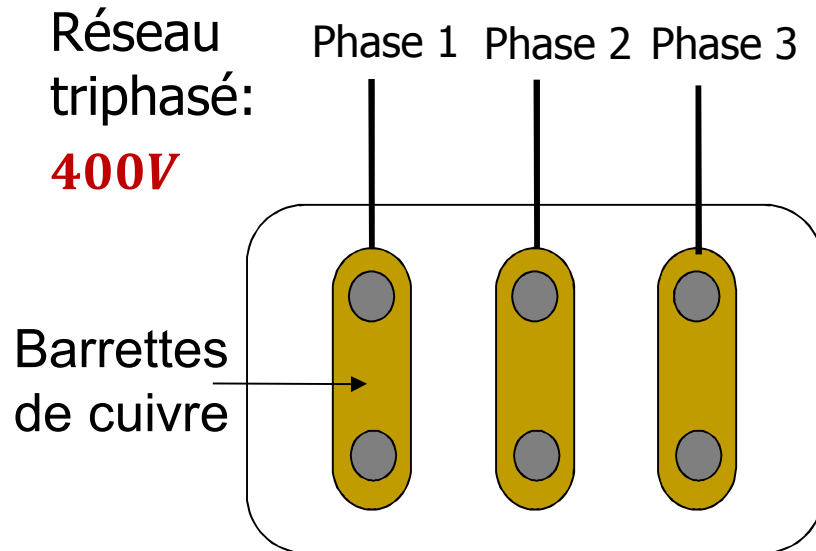
- Couplé en Δ sur un réseau triphasé 220V (entre phases);
- Couplé en Y sur un réseau triphasé 380V (entre phases).



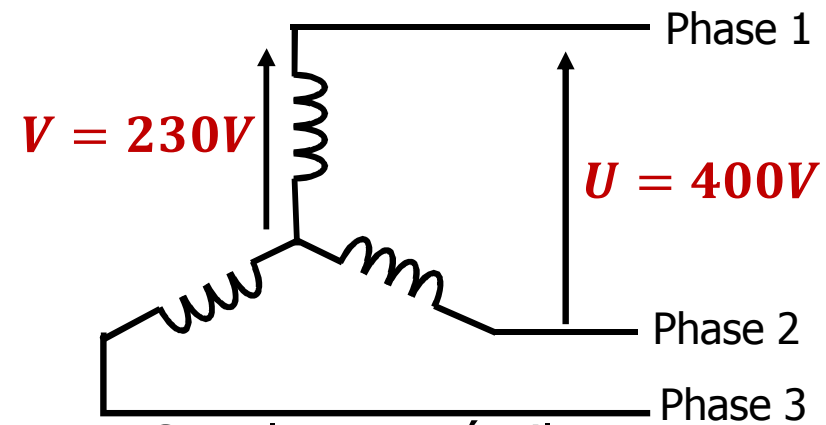
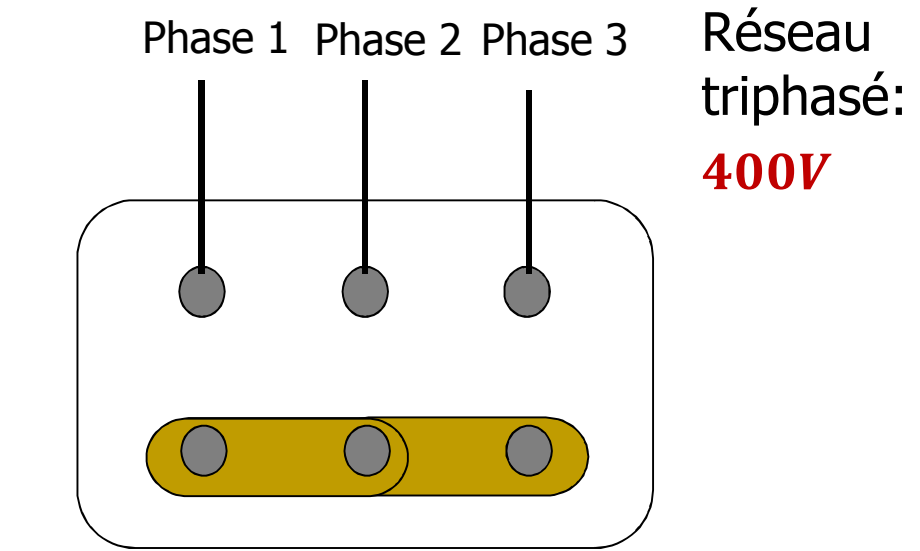
Machine asynchrone triphasée

Exemple:

Moteur: plaque signalétique **400/690V** Moteur: plaque signalétique **230/400V**



Couplage en triangle



Couplage en étoile

Machine asynchrone triphasée

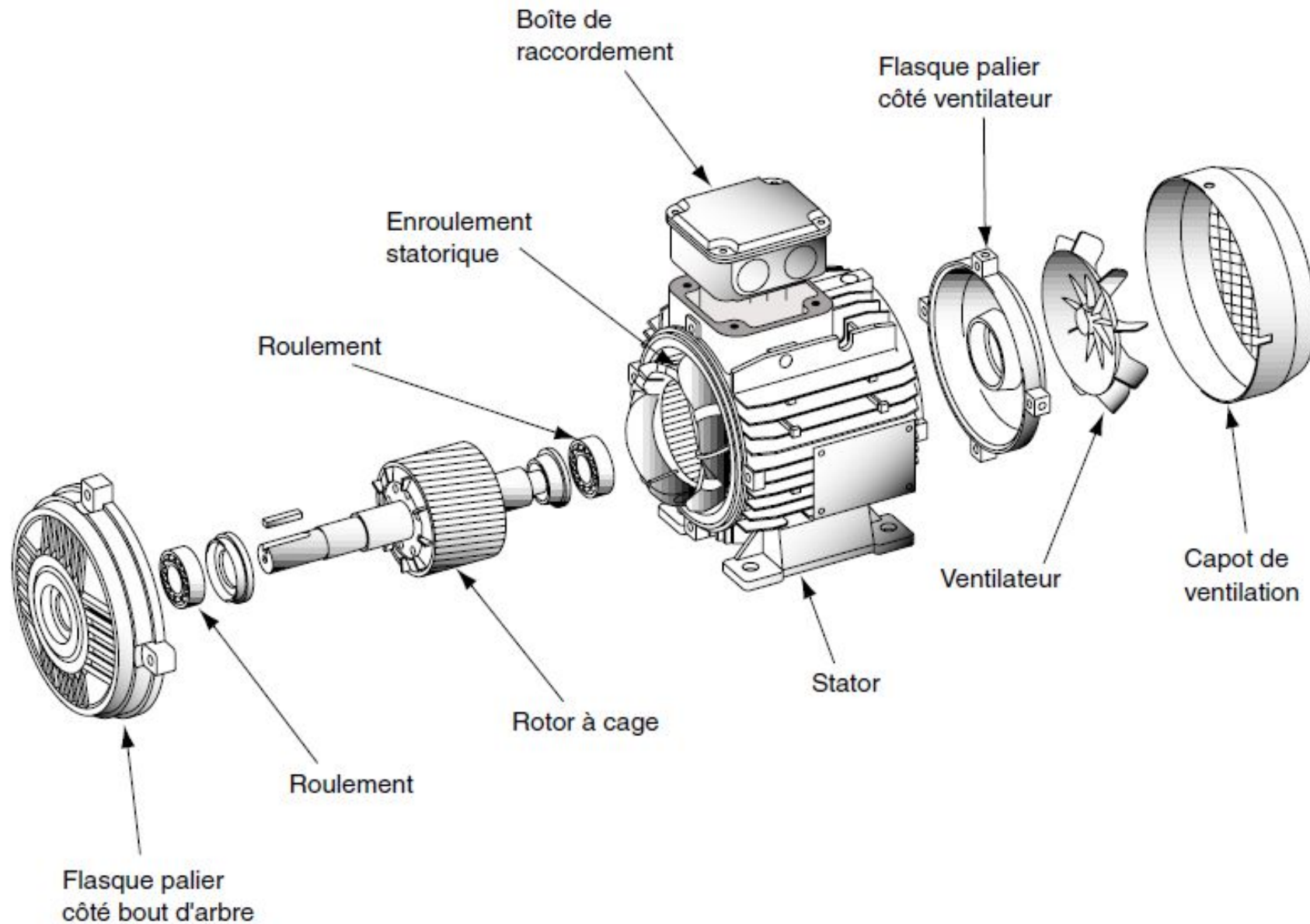
- Si la tension composée du réseau = tension triangle (Δ) du moteur alors celui-ci sera couplé en triangle;
- Si la tension composée du réseau = tension étoile (Y) du moteur alors celui-ci sera couplé en étoile;
- Si la tension composée du réseau > tension étoile (Y) du moteur alors aucun couplage n'est possible car le moteur sera suralimenté ;
- Si la tension composée du réseau < tension triangle (Δ) du moteur alors aucun couplage n'est possible car le moteur sera sous-alimenté.

Réseau	Moteur 127 V/220 V	Moteur 230V/400V	Moteur 400V/660V
127 V/220V	Etoile	Triangle	Aucun
230 V/400V	Aucun	Etoile	Triangle
400 V/660V	Aucun	Aucun	Etoile

Règle: Si la petite tension du moteur (c'est à dire la tension max supportée par un enroulement du stator) est égale à la tension simple du réseau, le stator est couplé en étoile, et si elle correspond à la tension composée du réseau, on couple le stator en triangle.

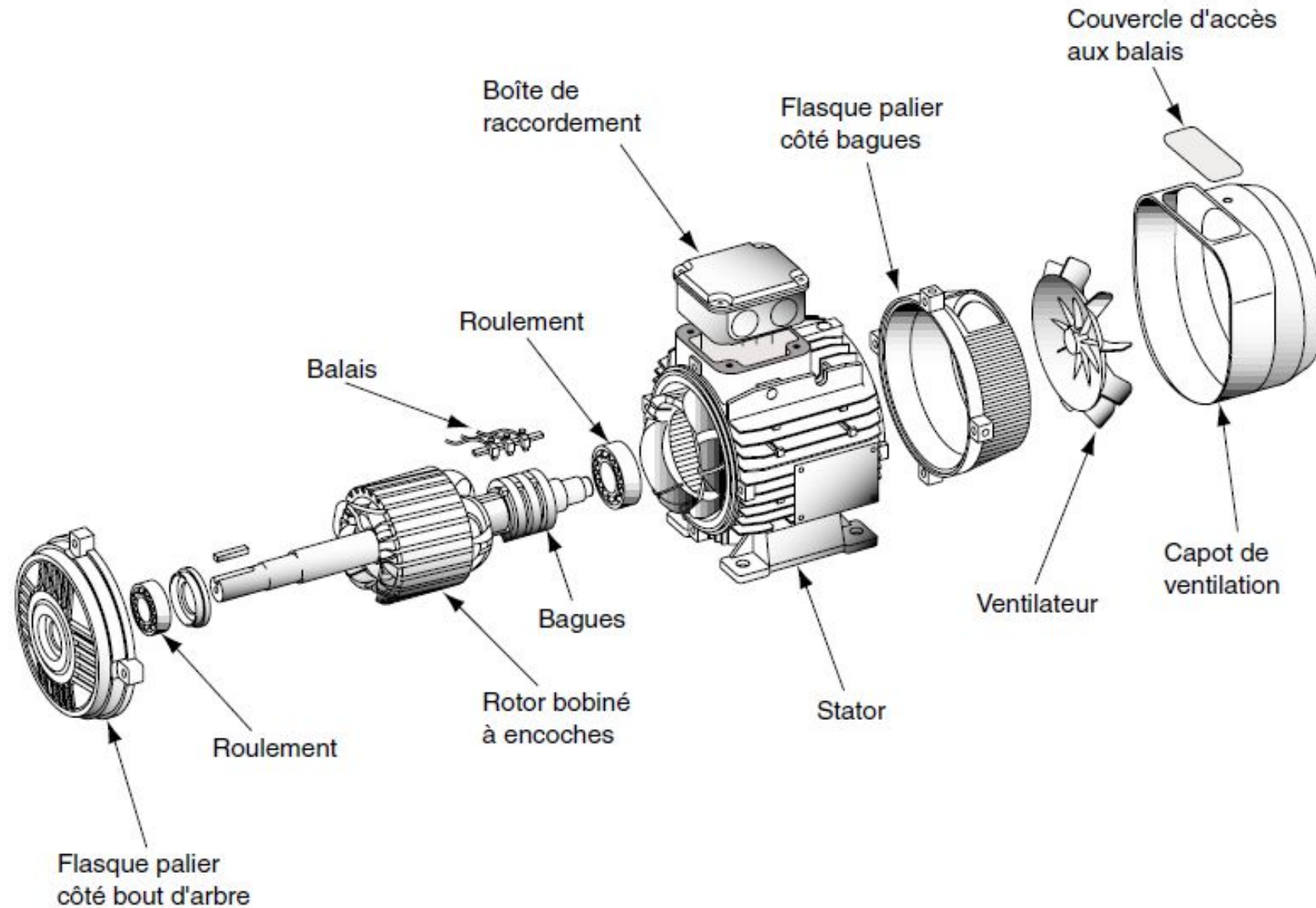
Machine asynchrone triphasée

□ Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage



Machine asynchrone triphasée

□ Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné

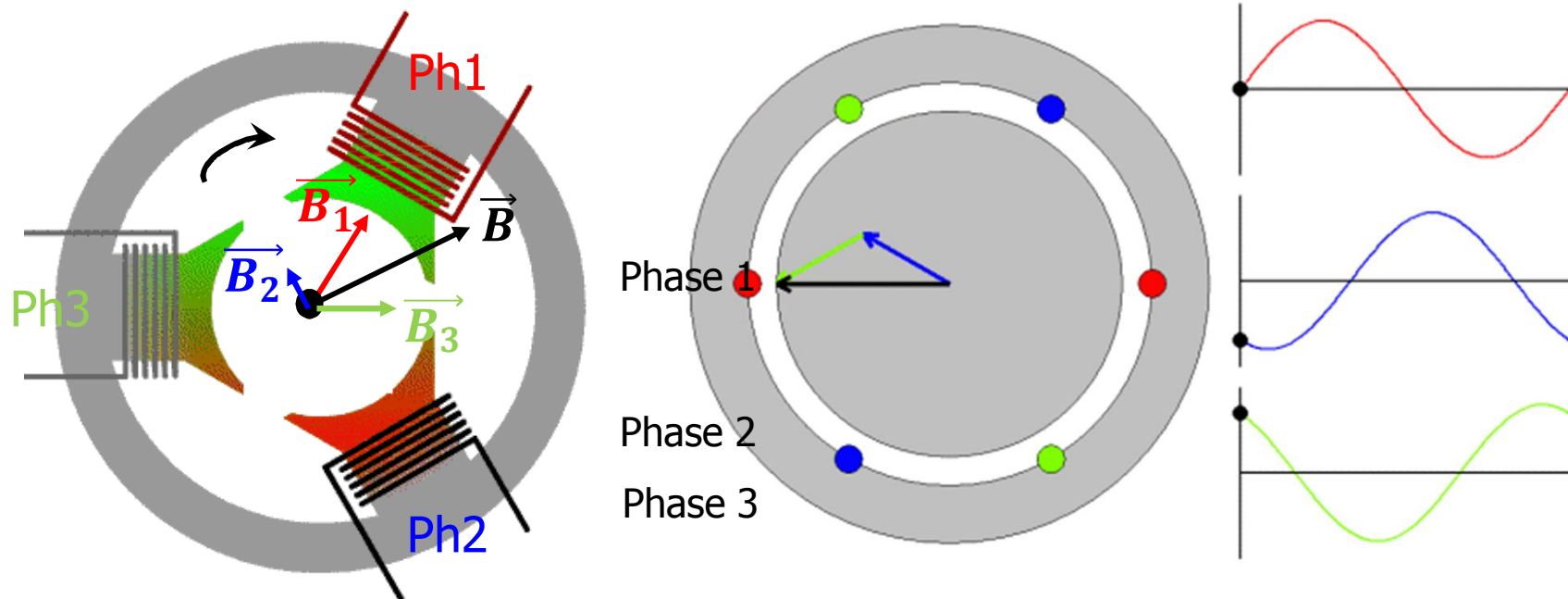


Machine asynchrone triphasée

2. Principe de fonctionnement:

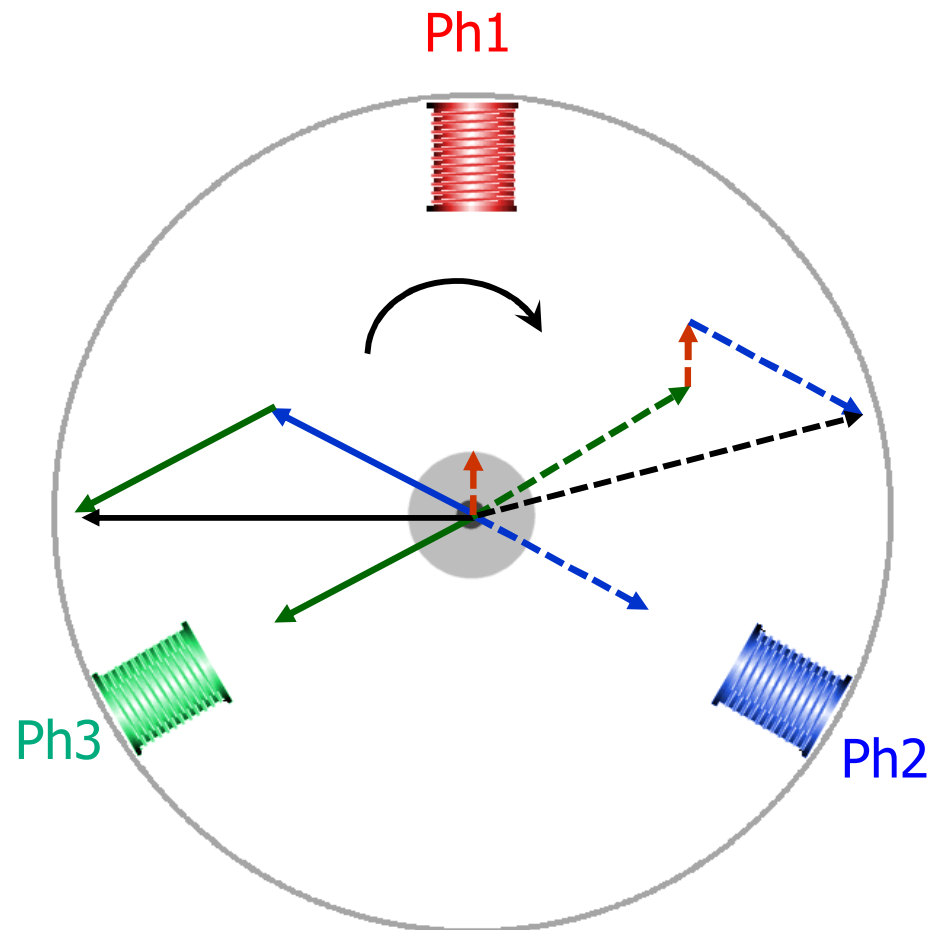
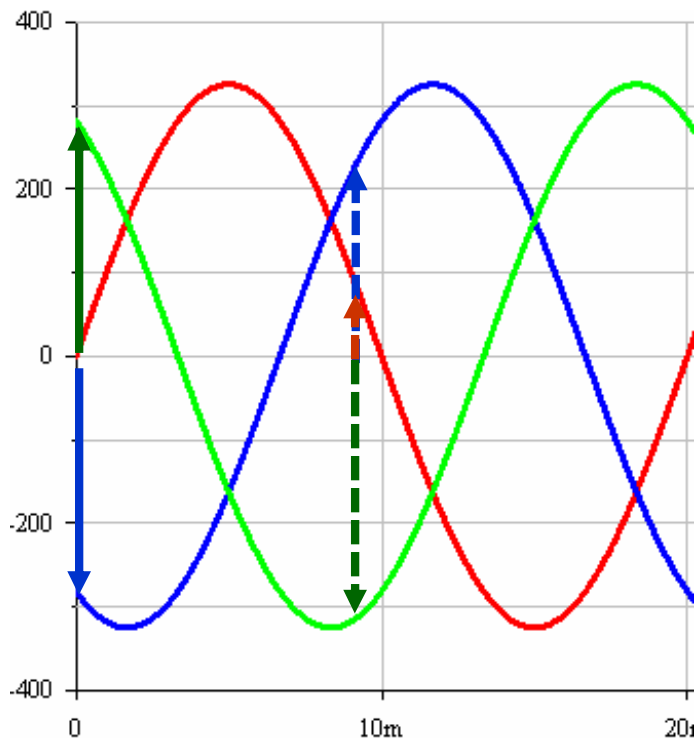
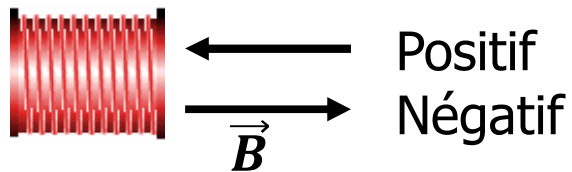
2.1. Création du champ tournant:

- Trois enroulements statoriques, géométriquement décalés de 120° , sont alimentés chacun par une des phases d'un réseau triphasé alternatif;
- Les enroulements sont parcourus par des courants alternatifs de pulsation ω et déphasés entre eux dans le temps de 120° , créent un champ magnétique d'amplitude fixe tournant à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = \omega/p$ imposée par la fréquence $f = 2\pi/\omega$ du réseau et le nombre de paires de pôles p de la machine.



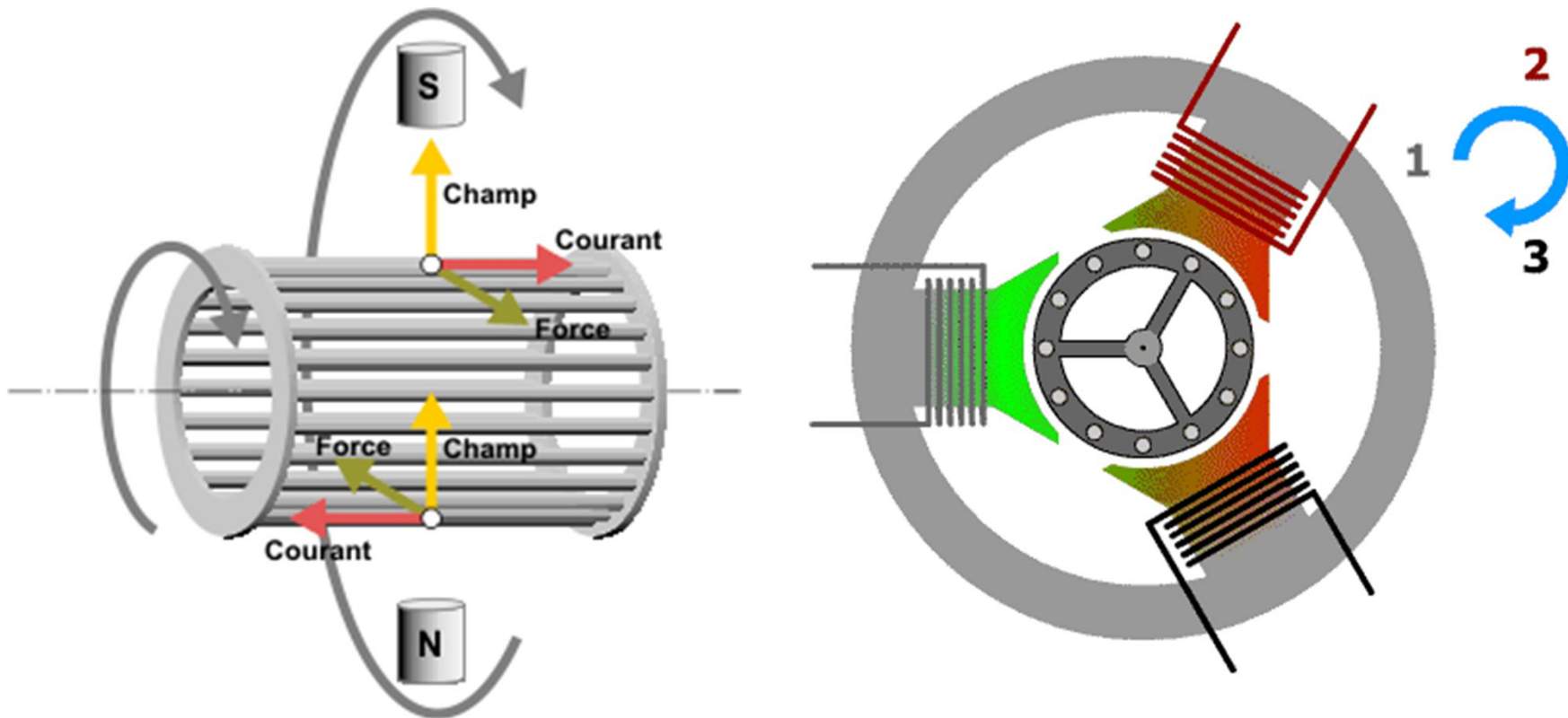
Machine asynchrone triphasée

- Chaque enroulement parcouru par un courant alternatif sinusoïdal produit un champ magnétique alternatif sinusoïdal dirigé suivant le même axe, est maximal quand le courant dans l'enroulement est maximal.



Machine asynchrone triphasée

- Les conducteurs des enroulements du rotor, balayés par le champ tournant statorique, donc soumis à des variations de flux, sont le siège de forces électromotrices (f.e.m) induites (loi de Lenz-Faraday);
- Le rotor étant en court-circuit, ces f.é.m produisent des courants induits;
- Les courants rotoriques placés dans le champ tournant sont soumis à des forces électromagnétiques qui produisent un couple moteur qui entraîne la mise en mouvement de rotation du rotor.



Machine asynchrone triphasée

- Le sens de rotation est tel que, d'après la loi de Lenz, la rotation s'oppose à la cause qui lui donne naissance. Cette cause est la rotation du champ tournant statorique par rapport aux conducteurs du rotor;
- Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ tournant mais avec une vitesse Ω légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme Ω_s .
- Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

2.2. Glissement:

- Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse de synchronisme Ω_s que le champ magnétique;
- Sinon le rotor ne serait plus balayé par le champ tournant et il y aurait disparition des f.e.m et des courants induits et par conséquent aucun couple moteur (et la machine ne serait plus entraînée); puisque vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique.
- La vitesse de synchronisme Ω_s et la vitesse de rotation du rotor Ω ne peuvent pas être synchrones d'où le nom de **moteur asynchrone**.
- La différence de vitesse $\Omega_s - \Omega$ entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

Machine asynchrone triphasée

- L'origine des courants rotoriques réside dans la différence des vitesses Ω_s et Ω .
- La vitesse relative du champ tournant produit par le stator par rapport au rotor est:

$$\Omega_s - \Omega$$

- La vitesse relative entre Ω_s et Ω est appelée le glissement et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

- $\Omega_s = \omega/p$ (rad/s) ; $n_s = f/p$ (tr/s) la fréquence de synchronisme et n le fréquence de rotation du rotor. $\Omega = 2\pi n$; si n est exprimée en (tr/min), alors: $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$;

- La vitesse de rotation de la machine est:

$$\Omega = (1 - g)\Omega_s$$

- Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation appliquée au moteur;
- Il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé, et il augmente si le moteur est sous alimenté.

Machine asynchrone triphasée

Exemple 1:

Vitesse de synchronisme d'un moteur alimenté en courant alternatif de 50Hz:

Nombre de paires de pôles: p	Vitesse de synchronisme: n_s (tr/min)
1	3000
2	1500
3	1000
4	750

Exemple 2: Valeur du glissement g_n au point de fonctionnement nominal d'un moteur tournant à $n = 965 \text{tr/min}$; ($p = 3$)

$$g_n = \frac{1000 - 965}{1000} = 0,035 = 3,5\%$$

Remarque: En régime nominal, le glissement g est toujours faible, de l'ordre de quelques pour cents :

- de 2 % pour les machines triphasées les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines;
- Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité fonctionne avec un faible glissement.

Machine asynchrone triphasée

2.3. Fréquence des courants rotoriques induits:

La vitesse relative à laquelle le champ tournant balaie les conducteurs du rotor est $\Omega_s - \Omega$, la pulsation ω_R des courants induits dans le rotor est:

$$\omega_R = p(\Omega_s - \Omega) = \omega \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$$\omega_R = g\omega$$

La fréquence des f.é.m. et des courants rotoriques est donc: $f_R = gf$

Remarque:

- La fréquence des grandeurs rotoriques est proportionnelle au glissement.
- En marche normale, le glissement est faible et la fréquence des courants rotoriques est aussi faible (quelques hertz).
- À l'arrêt $\Omega = 0$; $g = 1$; $f_R = f$.

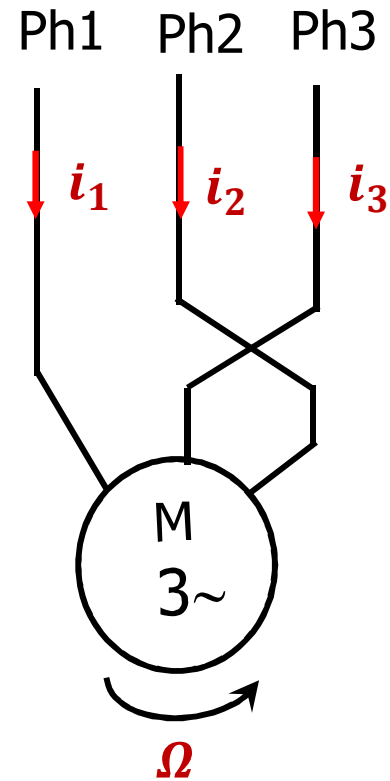
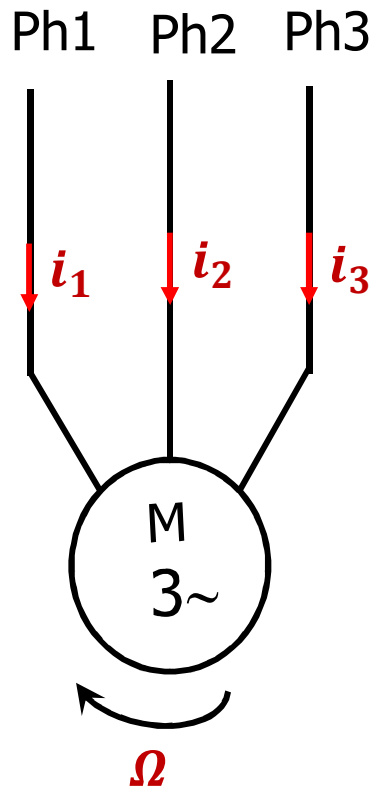
□ Vitesse de rotation du champ rotorique

- Les courants rotoriques, de fréquence f_R , engendrent à leur tour un champ rotorique qui tourne par rapport au rotor à la vitesse $\frac{\omega_R}{p} = \frac{g\omega}{p} = g\Omega_s$.
- Par rapport au stator, le champ rotorique tourne à la vitesse $\Omega_r = g\Omega_s + \Omega = \Omega_s$. Les champs statorique et rotorique tournent toujours à la même la vitesse de synchronisme Ω_s .

Machine asynchrone triphasée

2.4. Sens de rotation:

- Une permutation de deux fils de phase aux bornes du stator entraîne l'inversion du sens de rotation du champ tournant et donc le sens de la vitesse de rotation.



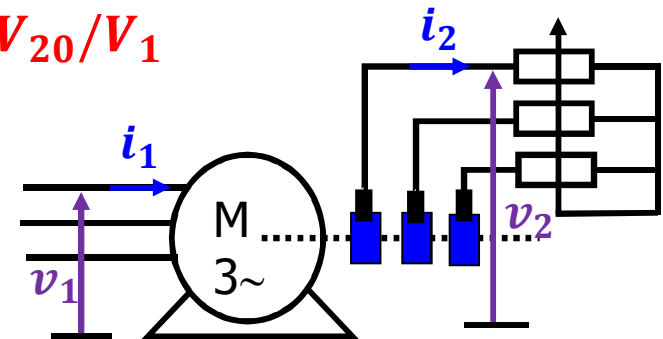
Machine asynchrone triphasée

3. Schéma monophasé équivalent:

En fonctionnement triphasé équilibré, La machine asynchrone peut être considérée comme un transformateur triphasé à champ tournant, dont le primaire est le stator et le secondaire est le rotor.

Notations:

- V_1 : tension efficace aux bornes d'une phase du stator (U_1 si couplage en triangle),
- V_{20} : tension efficace aux bornes d'une bobine rotorique ouverte (rotor immobile),
- I_1 : courant efficace dans une phase du stator (J_1 si couplage en triangle),
- I_2 : courant efficace dans une phase du rotor,
- m : rapport de transformation rotor/stator $m = V_{20}/V_1$
- R_1 : résistance d'une phase du stator,
- R_2 : résistance d'une phase du rotor,
- l_1 : inductance de fuite au stator,
- l_2 : inductance de fuite au rotor,
- L_m : inductance de magnétisation,
- R_f : résistance modélisant les pertes ferromagnétiques au stator.
- ϕ : flux du champ tournant dans l'entrefer, commun au stator et au rotor



Machine asynchrone triphasée

□ Pour une phase du stator et du rotor:

Considérons une machine asynchrone à rotor bobiné. En supposant qu'il s'agit d'un transformateur parfait:

- La tension induite aux bornes d'un enroulement statorique e_1 et rotorique e_2 ;

$$v_1 = v'_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = e_1; \quad v_2 = v'_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} = e_2$$

Avec N_1 et N_2 le nombre de spires de l'enroulement statorique et rotorique.

- La pulsation ω des courants statoriques est imposée par l'alimentation; la pulsation des courants rotorique est $\omega_R = g\omega$. On obtient:
- En notation complexe: $\underline{E}_1 = j\omega N_1 \underline{\phi}$; $\underline{E}_2 = j\omega_R N_2 \underline{\phi}$;
- En valeurs efficaces (relation de Boucherot):

$$E_1 = 4,44 N_1 f \phi_{max}; \quad E_2 = 4,44 N_2 g f \phi_{max}$$

- Le rapport des valeurs efficaces des tensions rotorique et statorique donne:

$$\frac{E_2}{E_1} = g \frac{N_2}{N_1} = gm$$

Rotor immobile: Le rapport de transformation à l'arrêt ($g = 1$) entre une phase du rotor et une phase du stator est: $m = \frac{V_{20}}{V_1}$.

Machine asynchrone triphasée

Rotor en rotation: Lorsque la machine tourne, le rapport de transformation est égal à gm ; il dépend du glissement.

□ Equations des tensions statoriques et rotoriques:

- Au stator (la pulsation des courants statoriques est ω):

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + j l_1 \omega \underline{I}_1$$

- Au rotor (la pulsation des courants rotoriques est $g\omega$):

$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - j l_2 g \omega \underline{I}_2$$

- Les f.e.m E_1 et E_2 créées par le flux tournant ϕ à travers l'enroulement statorique et l'enroulement rotorique sont telles que: $\underline{E}_2 = gm \underline{E}_1$

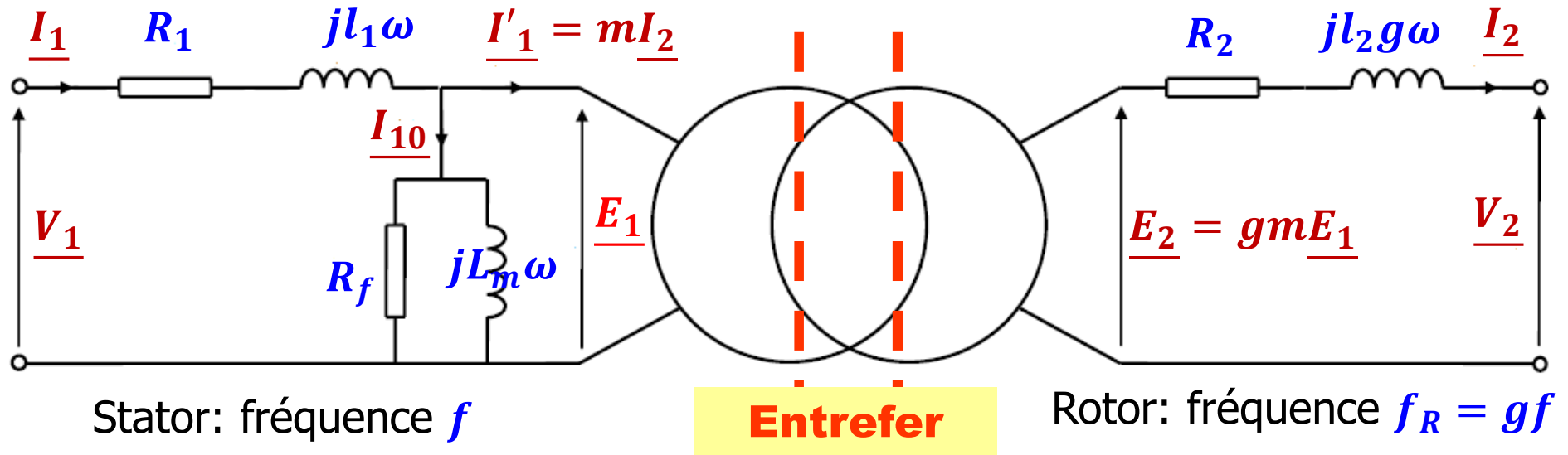
□ Equations des courants statoriques et rotoriques:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}'_1; \quad \underline{I}'_1 = m \underline{I}_2$$

- Comme dans un transformateur, toute augmentation du courant I_2 dans le rotor entraîne une augmentation du courant I_1 dans le stator;
- Dans le moteur, l'augmentation du courant rotorique résulte de l'augmentation du couple résistant de la charge;
- Cependant, différence importante avec le transformateur, le secondaire (rotor) n'est pas parcouru par des courants à la même fréquence que le primaire (stator).

Machine asynchrone triphasée

On obtient le schéma monophasé équivalent étoile:



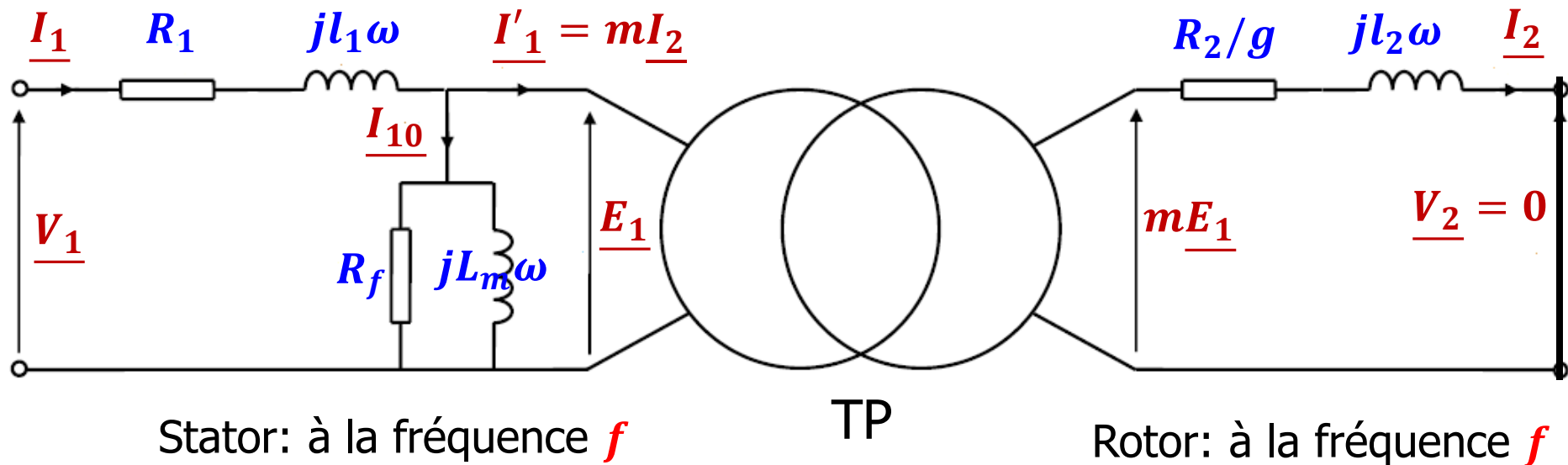
- Comme les phases du rotor sont en court-circuit, on a: $V_2 = 0$
- $0 = gm\underline{E_1} - R_2\underline{I_2} - jl_2g\underline{\omega I_2}$
- Si on utilise un rhéostat rotorique, on inclut sa résistance dans R_2
- En divisant par g l'expression de la tension rotorique, on obtient:

$$0 = m\underline{E_1} - \frac{R_2}{g}\underline{I_2} - jl_2\underline{\omega I_2}$$

Machine asynchrone triphasée

On obtient le schéma monophasé équivalent d'une machine asynchrone, le stator et le rotor sont à la même pulsation ω :

- On constate que la résistance du secondaire R_2/g varie avec le glissement.

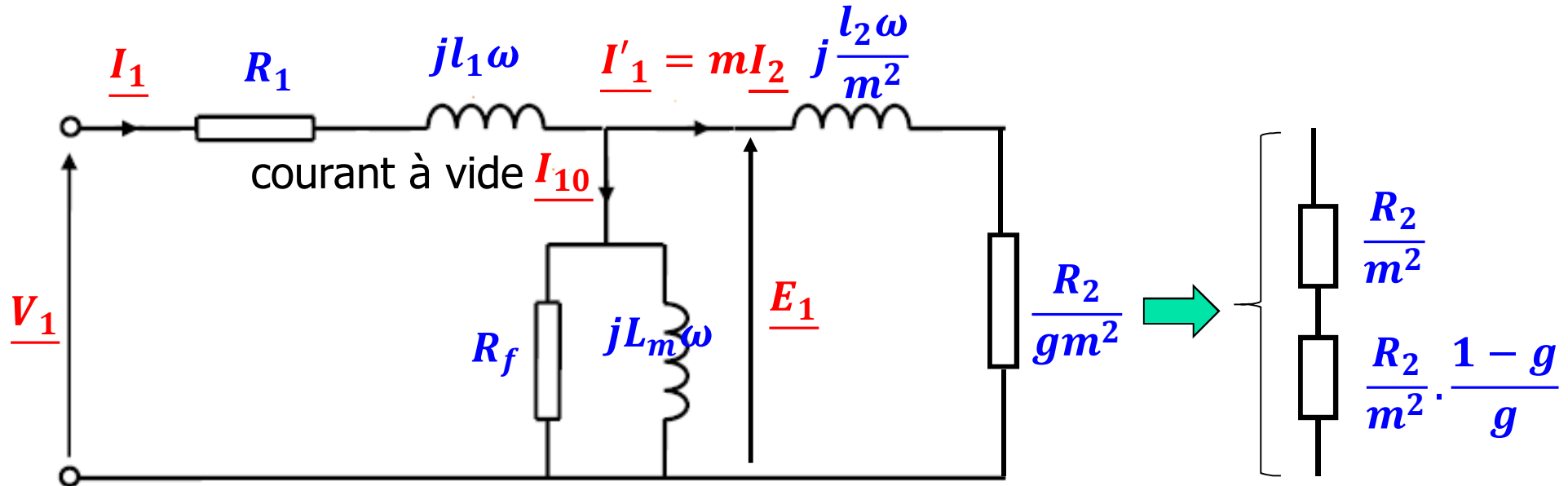


Remarque:

- Bien que le courant magnétisant I_{10} soit relativement plus élevé, en raison de l'entrefer, que dans le cas du transformateur, on peut cependant négliger la chute de tension supplémentaire due à ce courant dans R_1 et l_1 .

Machine asynchrone triphasée

- En ramenant au primaire les éléments du secondaire, on obtient:



- Le moteur asynchrone est équivalent à un transformateur statique dont le secondaire est supposé sans résistance et de réactance $X_2 = l_2 \omega$ alimentant une charge variable R_2/g .

Remarque:

- $\frac{R_2}{g m^2}$, représente la puissance active transmise au rotor (puissance électromagnétique),
- $\frac{R_2}{m^2}$, représente les pertes Joule dans le rotor,
- $\frac{R_2}{m^2} \cdot \frac{1-g}{g}$, représente la puissance mécanique sur le rotor,

Machine asynchrone triphasée

4. Bilan des puissances en fonctionnement moteur:



- Puissance active absorbée par le moteur:

$$P_a = \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi$$

- Pertes Joule au stator:

$$P_{JS} = 3R_1I_1^2; \quad (J_1 \text{ si couplage en triangle})$$

- Pertes fer au stator:

$$P_{fS} = 3 \frac{E_1^2}{R_f} \approx 3 \frac{V_1^2}{R_f}$$

En fonctionnement nominal, les chutes de tension aux bornes de R_1 et l_1 sont faibles devant V_1 .

Machine asynchrone triphasée

- Puissance transmise du stator au rotor:

$$P_{TR} = P_a - P_{JS} - P_{fs} = 3 \frac{R_2}{gm^2} I_1'^2$$

- C'est le champ tournant à Ω_s qui est à l'origine de la puissance électromagnétique transmise au rotor à travers l'entrefer:

$$P_{em} = P_{TR} = C_{em} \Omega_s$$

avec C_{em} est le couple électromagnétique transmis au rotor.

- Pertes Joule au rotor:

$$P_{JR} = 3R_2 I_2^2 = 3 \frac{R_2}{m^2} I_1'^2; \text{ puisque: } I_1' = m I_2$$

- On a également la relation suivante (très utilisée, car R_2 et I_2 ne sont pas mesurables pour un moteur à cage):

$$P_{JR} = g P_{TR}$$

- Puissance mécanique sur le rotor:

$$P_{méca} = P_{TR} - P_{JR} = (1 - g) P_{TR} = C_{em} \Omega$$

- Puissance mécanique utile délivrée sur l'arbre du moteur:

$$P_u = P_{méca} - P_{pm} = (C_{em} - C_{pm}) \Omega = C_u \Omega$$

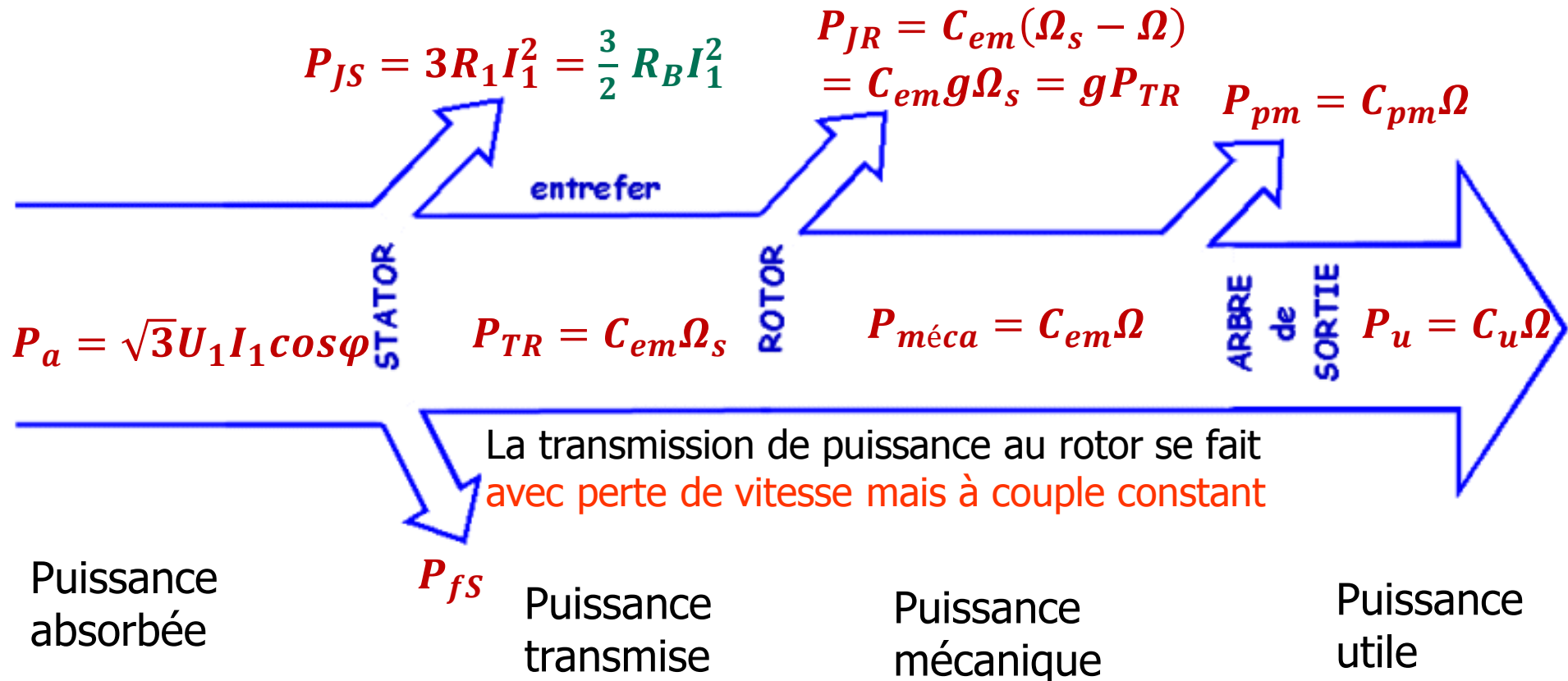
avec: C_u le couple utile et C_{pm} le couple de pertes mécaniques.

Machine asynchrone triphasée

Remarque:

En marche normale, on néglige les pertes dans le fer du rotor, car elles sont proportionnelles à la fréquence $f_R = gf$ très faible des courants rotoriques.

□ Bilan des puissances:



Machine asynchrone triphasée

Remarque: La résistance R_B est mesurée entre deux bornes statoriques du moteur, quel que soit le couplage:

- $R_B = 2R_1$ pour un couplage en étoile,
- $R_B = \frac{2}{3}R_1$ pour un couplage en triangle.

□ Rendement:

- Le rendement est défini par:

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

On a: $P_u = P_{TR} - P_{JR} - P_{pm} = (1 - g)(P_a - P_{JS} - P_{fS}) - P_{pm}$; On obtient:

$$\eta = \frac{(1 - g)(P_a - P_{JS} - P_{fS}) - P_{pm}}{P_a}$$

- Le rendement maximal de la MAS est lorsque l'on néglige toutes les pertes. Les seules pertes non négligeables, sont les pertes Joule rotor car c'est le principe même de la MAS: courant induits rotoriques.
- D'où: $\eta = (1 - g)$, appelé aussi rendement du rotor, puisque $\eta_r = \frac{P_u}{P_{TR}} =$

$$\frac{P_{TR} - P_{JR} - P_{pm}}{P_{TR}} = (1 - g);$$

Remarque: Le rendement est bon si la résistance du rotor est faible.

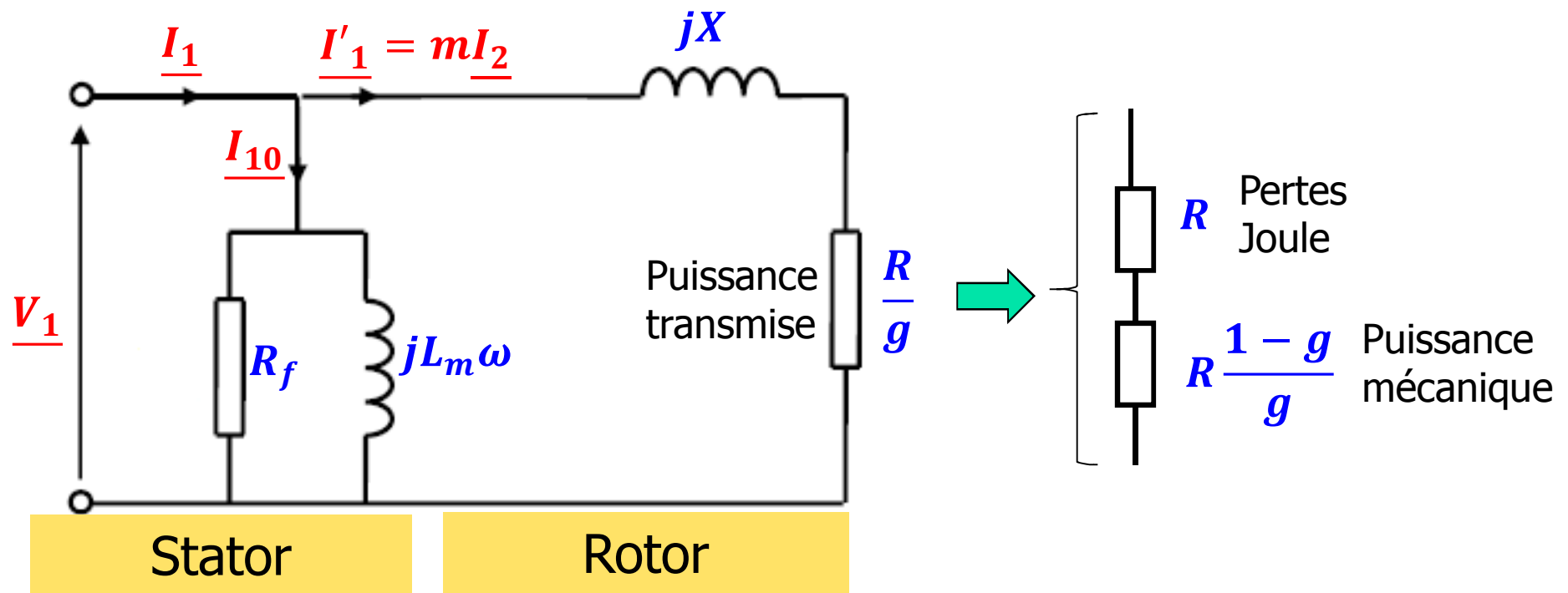
Machine asynchrone triphasée

5. Couple électromagnétique:

5.1. expression du couple:

Dans la pratique, on néglige la chute de tension aux bornes de la résistance R_1 et de l'inductance de fuite l_1 au stator.

- En posant $R = R_2/m^2$ et $X = l_2\omega/m^2$, on obtient le schéma équivalent simplifié:



- Si on néglige les pertes mécaniques, on a: $C_u = C_{em} - C_{pm} \Rightarrow C_u \approx C_{em} = C$

Machine asynchrone triphasée

- On calcule à partir du schéma simplifié le courant I'_1 :

$$I'_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}}$$

- La puissance électromagnétique est:

$$P_{em} = P_{TR} = C_{em}\Omega_s$$

- Le couple électromagnétique est:

$$C_{em} = C = \frac{P_{TR}}{\Omega_s} = \frac{3 \frac{R}{g} I'^2_1}{\frac{\omega}{p}}$$

- D'où:

$$C_{em} = C = \frac{3pV_1^2}{\omega} \frac{\frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}$$

Maximum du couple:

- Le maximum du couple que peut fournir le moteur est obtenu lorsque:

$$dC/dg = 0$$

Machine asynchrone triphasée

- Le couple est maximal pour un glissement:

$$g_{max} = \frac{R}{X} = \frac{R_2}{l_2 \omega}$$

- Le couple maximal est:

$$C_{max} = \frac{3pV_1^2}{\omega} \frac{1}{2X}$$

- Remplaçons $X = l_2 \omega / m^2$ et $\omega = 2\pi f$, le couple maximal devient:

$$C_{max} = \frac{3pm^2}{2l_2} \cdot \frac{V_1^2}{\omega^2} = \frac{3pm^2}{8\pi^2 l_2} \cdot \frac{V_1^2}{f^2} = k \left(\frac{V_1}{f} \right)^2$$

- Le couple maximal ne dépend pas de la résistance R_2 du rotor, mais la valeur du glissement g_{max} pour laquelle il est obtenu est proportionnelle à cette résistance.
- Pour avoir un couple maximal au démarrage ($g = 1$), il faut que:

$$g_{max} = \frac{R}{X} = 1 \Rightarrow R_2 = l_2 \omega$$

- Au démarrage ($\Omega = 0$, $g = 1$), le couple de démarrage ou de décollage est:

$$C_d = \frac{3pV_1^2}{\omega} \frac{R}{R^2 + X^2}$$

Machine asynchrone triphasée

5.2. Caractéristique mécanique $C = f(g)$ ou $C = f(\Omega)$

- Fonctionnement au synchronisme $\Omega = \Omega_s$; $g = 0$; d'où $C = 0$,
- Fonctionnement proche du synchronisme (glissement faible) $g \ll g_{max}$ et $\frac{R}{g} \gg X$, donc le couple est sensiblement proportionnel au glissement:

$$C = \frac{3pV_1^2}{\omega} \cdot \frac{g}{R}$$

- Pour les glissements élevés $g \gg g_{max}$:

$$C = \frac{3pV_1^2}{\omega X^2} \cdot \frac{R}{g}$$

- La courbe est symétrique par rapport à l'origine $C(-g) = -C(g)$.
- Les valeurs négatives de couple correspondent à un fonctionnement en génératrice.

Remarque:

- En régime établi, le glissement est faible : c'est la « zone de fonctionnement utile de la caractéristique » de la machine.
- L'expression du couple peut s'écrire sous la forme:

$$C = \frac{2C_{max}}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g}}$$

Machine asynchrone triphasée

5.3. Différents modes de fonctionnement:

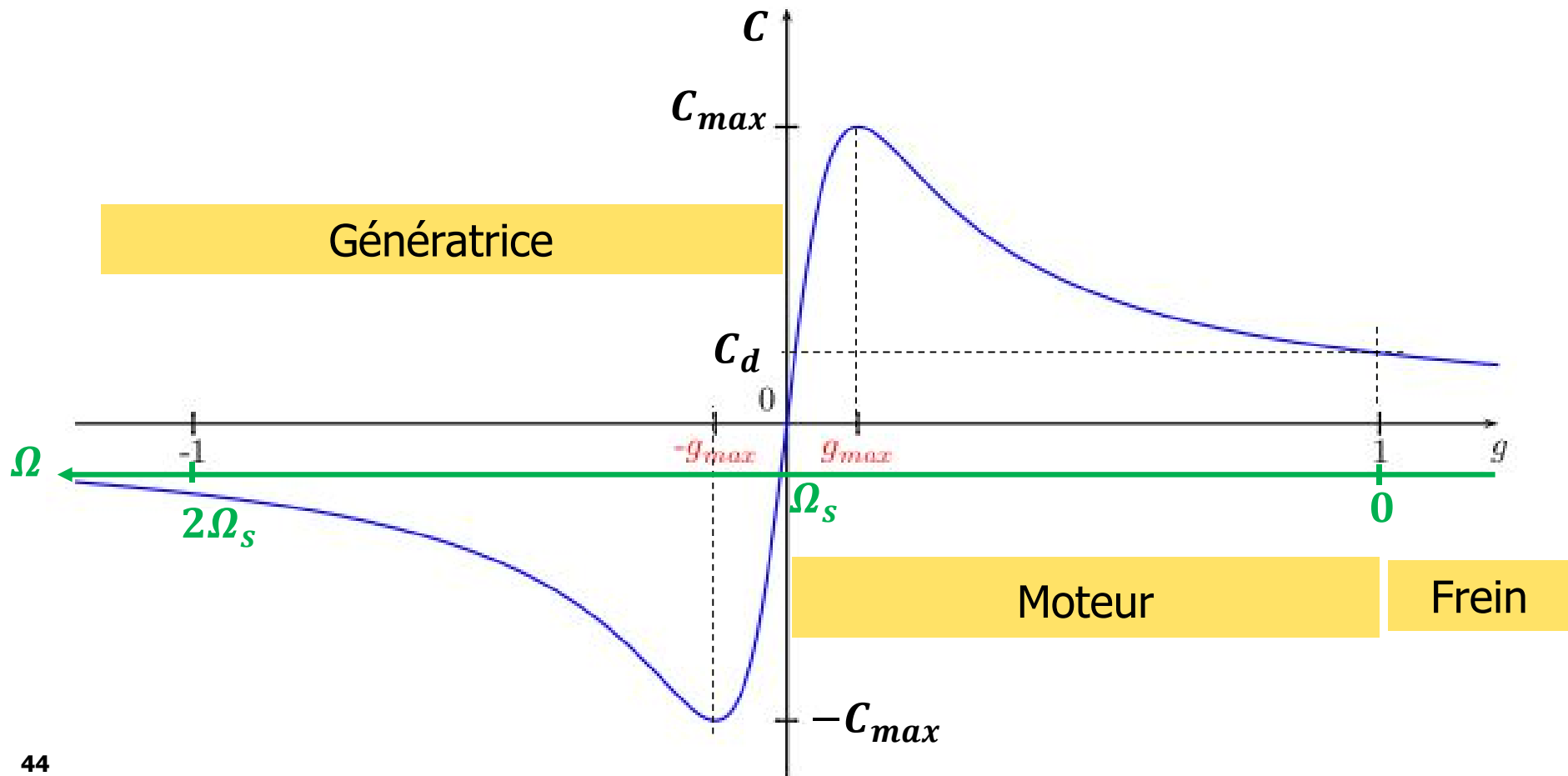
Bilan de puissance simplifié: En néglige les pertes P_{JS} ; P_{fS} et P_{pm} , on obtient: $P_a = P_{TR} = \frac{P_{JR}}{g}$; $P_u = P_{méca} = (1 - g)P_{TR}$

<p>Fonctionnement en génératrice frein:</p> <ul style="list-style-type: none"> • À l'arrêt $\Omega = 0$; donc $g = 1$ • $\Omega < 0$; donc $g > 1$ <p>$g > 1$; $\Omega < 0$</p>	<p>Fonctionnement en moteur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Au démarrage: $\Omega = 0$; donc $g = 1$ • Au synchronisme: $\Omega = \Omega_s$; donc $g = 0$; <p>$0 < g < 1$; $0 < \Omega < \Omega_s$</p>	<p>Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone</p> <ul style="list-style-type: none"> • Au synchronisme: $\Omega = \Omega_s$; donc $g = 0$ • Lorsque Ω dépasse Ω_s; $\Omega > \Omega_s$; donc $g < 0$;
<p>$P_{JR} > 0$ $P_{TR} = P_{JR}/g > 0$ $P_u = (1 - g)P_{TR} < 0$</p>	<p>$P_{JR} > 0$ $P_{TR} = P_{JR}/g > 0$ $P_u = (1 - g)P_{TR} > 0$</p>	<p>$P_{JR} > 0$ $P_{TR} = P_{JR}/g < 0$ $P_u = (1 - g)P_{TR} < 0$</p>
<p>Le champ tournant statorique et le rotor tournent en sens inverses (naissance d'un couple de freinage)</p>	<p>Le rotor tourne dans le sens que le champ tournant statorique (la machine fournit de la puissance mécanique à la charge)</p>	<p>La machine est entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (la machine fournit de la puissance électrique au réseau);</p>

Machine asynchrone triphasée

Remarque: La génératrice asynchrone est utilisée dans les petites centrales électriques de moins de 5MW (hydraulique, éolienne,...). L'énergie réactive est toujours fournie par le réseau, pour créer le champ tournant pour faire apparaître les courants rotoriques.

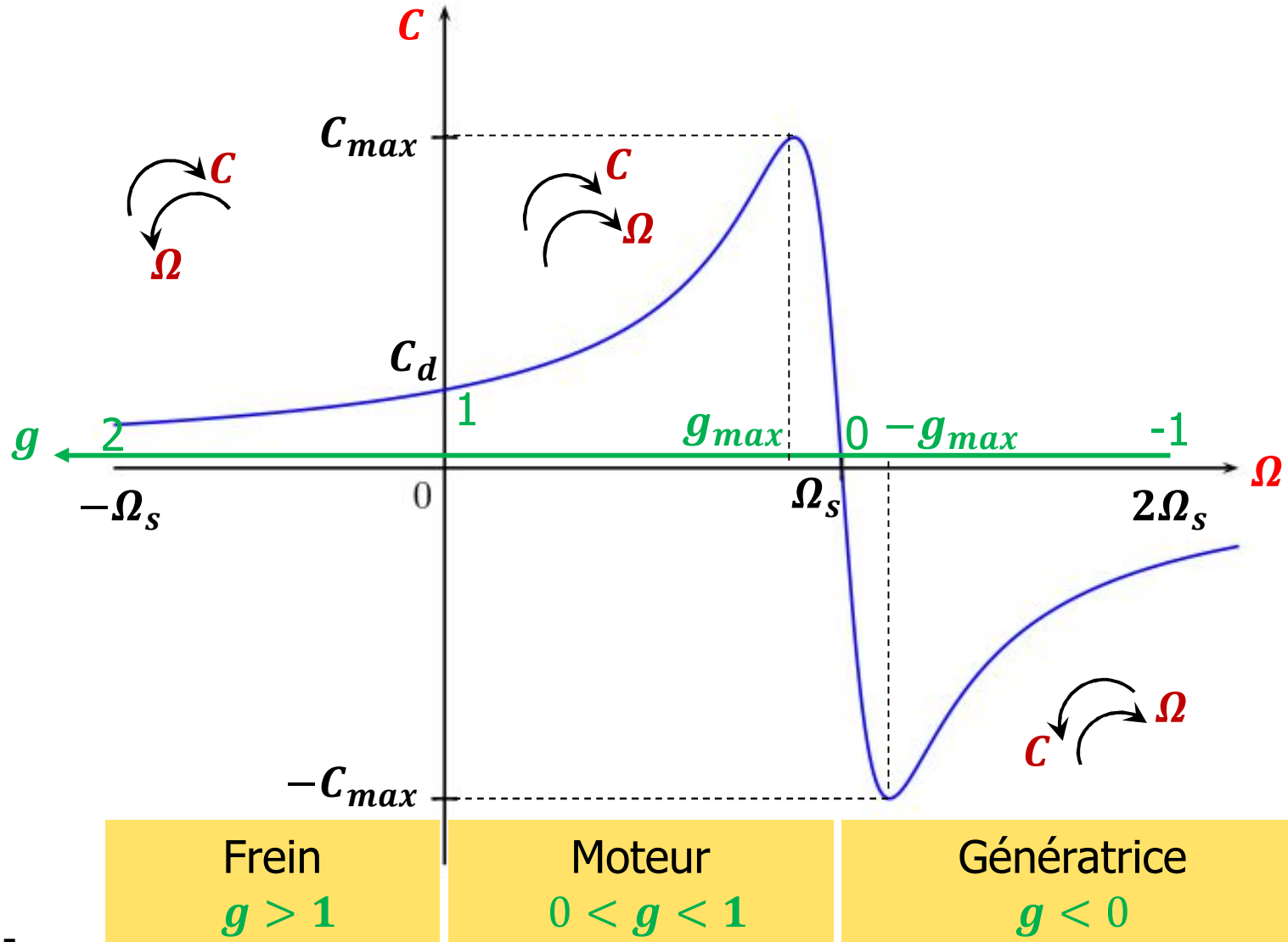
□ **Caractéristique mécanique:** $C = f(g)$



Machine asynchrone triphasée

□ **Caractéristique mécanique:** $C = f(\Omega)$

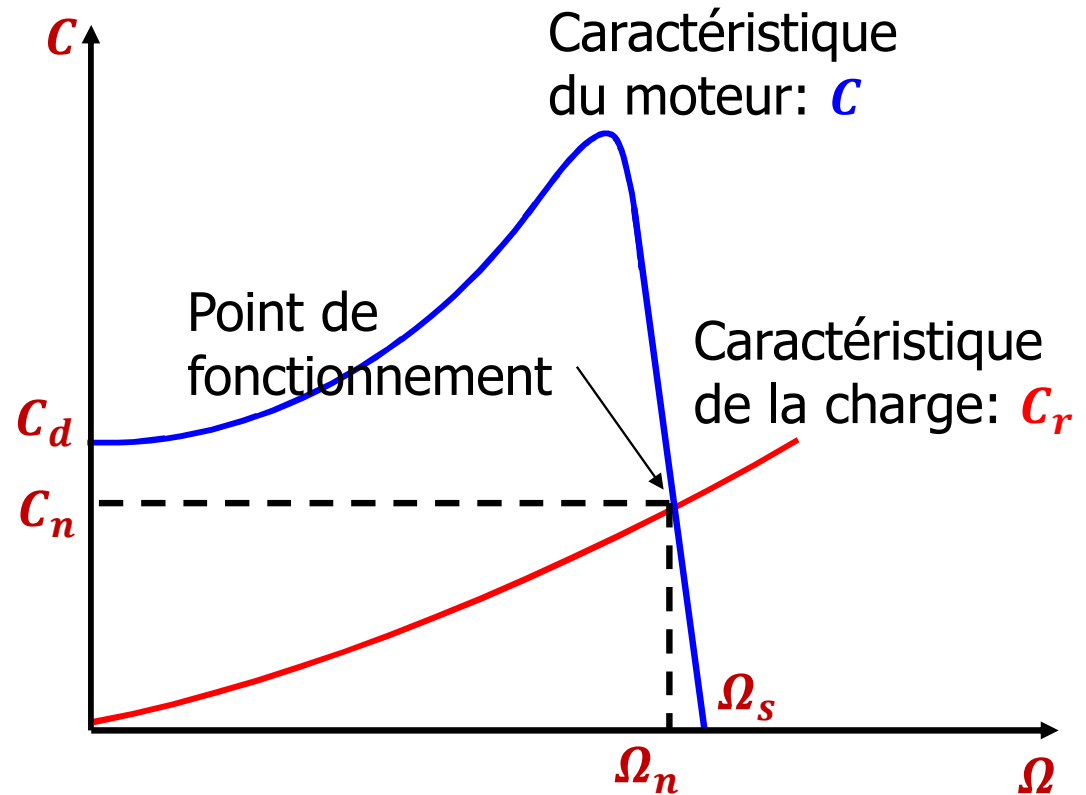
Elle se déduit de la courbe $C = f(g)$ grâce à la relation $\Omega = (1 - g)\Omega_s$



Machine asynchrone triphasée

5.4. Point de fonctionnement:

- Les caractéristiques du moteur et de la charge entraînée se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques $C = C_r$ en fonctionnement établi;
- Au démarrage lorsque le couple de démarrage C_d est supérieur à C_r , le moteur accélère. $C_d > C_r$ est le plus grand possible pour limiter la durée de démarrage.;
- En régime établi: $C = C_r$



Remarque: Lorsque le glissement est faible (près de la vitesse de synchronisme), le couple est linéaire par rapport à la vitesse. Cette zone correspond au point de fonctionnement nominal de la machine.

Machine asynchrone triphasée

5.5. Stabilité du fonctionnement:

Les points de fonctionnement stables pour l'association moteur + charge mécanique usuelle, correspondants à g compris entre $-g_{max}$ et $+g_{max}$.

On suppose que pour une raison extérieure (perturbation):

- la vitesse de l'ensemble « moteur + charge » augmente légèrement

$$\Omega \nearrow \Rightarrow C < C_r \Rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} =$$

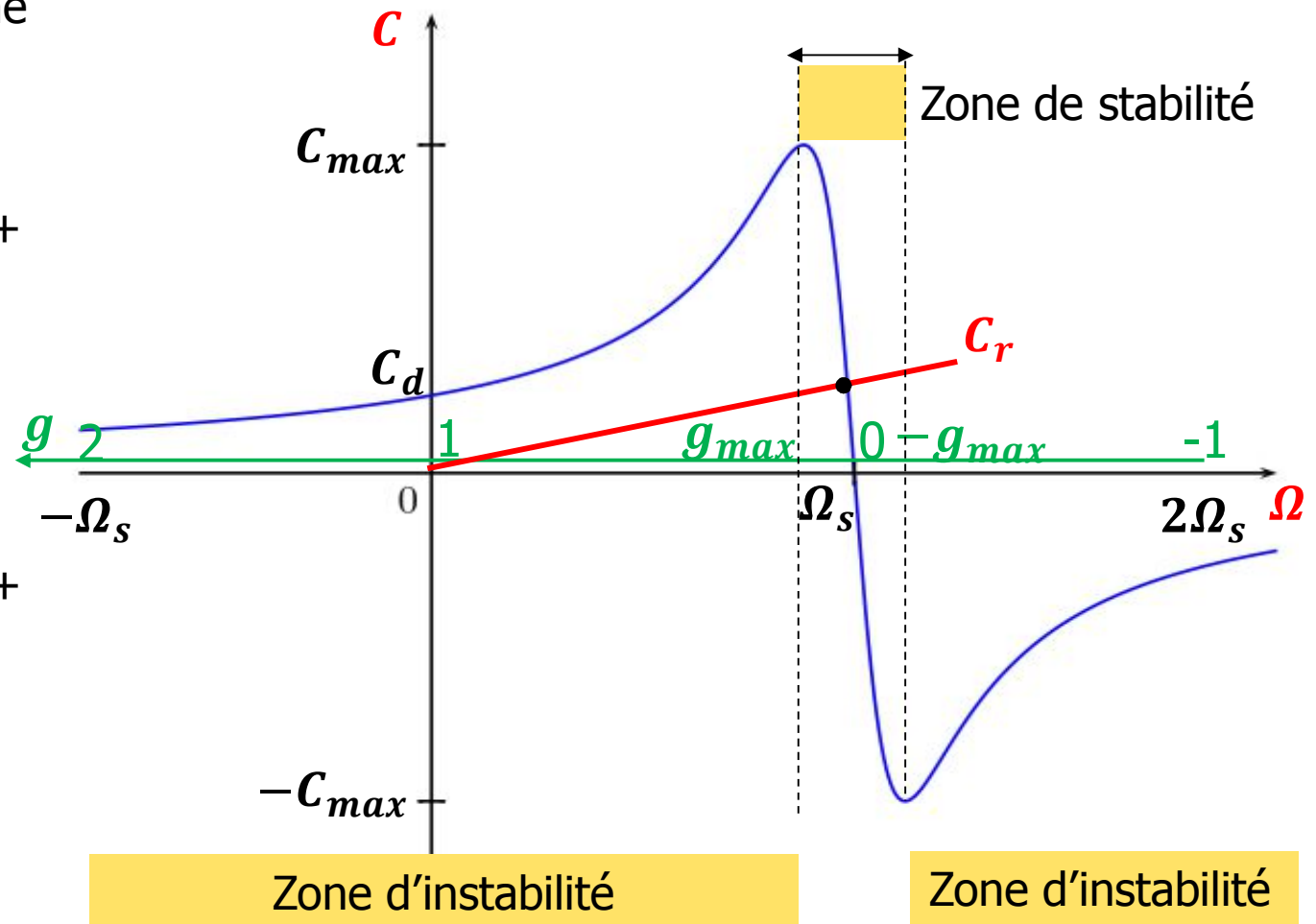
$$C - C_r < 0 \Rightarrow \Omega \searrow$$

- la vitesse de l'ensemble « moteur + charge » augmente légèrement

$$\Omega \searrow \Rightarrow J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_r > 0$$

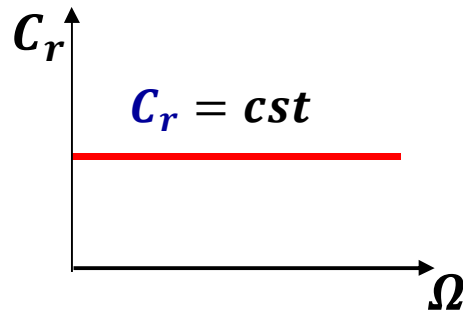
$$\Rightarrow \Omega \nearrow$$

Donc le groupe revient à sa vitesse initiale

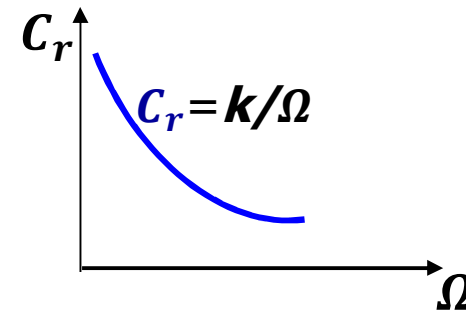


Machine asynchrone triphasée

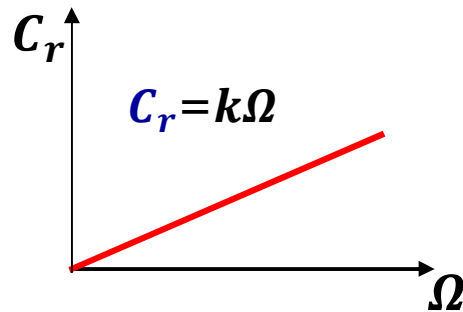
□ Exemple de charges:



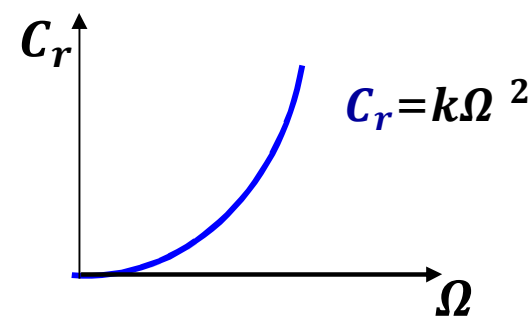
Machine à couple constant (engins de levage, laminoirs)



Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur,essoreuse)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur, pompe centrifuge)

Machine asynchrone triphasée

6. Démarrage du moteur asynchrone:

- Les procédés de démarrage ont pour intérêt de limiter le courant en ligne et de rendre le démarrage moins brutal.
- La machine asynchrone est largement utilisée dans l'industrie dans les entraînements à vitesse constante. Quand il est nécessaire de faire varier la vitesse, on utilise des variateurs électroniques de vitesse.
- En l'absence de variateur de vitesse ou démarreur, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage.

6.1. Démarrage direct:

Au démarrage du moteur, le courant de pointe I_d , est de l'ordre de 4 à 8 fois le courant nominal I_n .

Courant absorbé par le moteur:

- Le courant absorbé est: $I_1 = I_{10} + I'_1$
- On néglige I_{10} devant I'_1 dans le schéma équivalent, on obtient:
$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}}$$
- Le courant magnétisant I_{10} a une valeur nettement plus grande que dans un transformateur (30% à 50% de I_n , au lieu de 5% à 10% pour un transformateur), à cause de l'importance de l'entrefer stator/rotor (le flux doit traversé l'entrefer); mais on peut le négliger au début de démarrage.

Machine asynchrone triphasée

- Au démarrage ($\Omega = 0, g = 1$), le courant est:

$$I_d = \frac{V_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \gg I_n$$

- Au fur et à mesure de la montée en vitesse Ω , le glissement g et donc le courant I_1 absorbé par le moteur diminuent;
- Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal C_n ;
- Le démarrage direct est réservé aux moteurs de petite puissance ($P < 5kW$); (Machines-outils, machines à bois, pompes, ventilateurs), compresseurs, broyeurs et concasseurs).

Remarque 1: La pointe de courant au démarrage peut entraîner:

- Echauffement important des conducteurs,
- Chute de tension non négligeable au réseau d'alimentation.

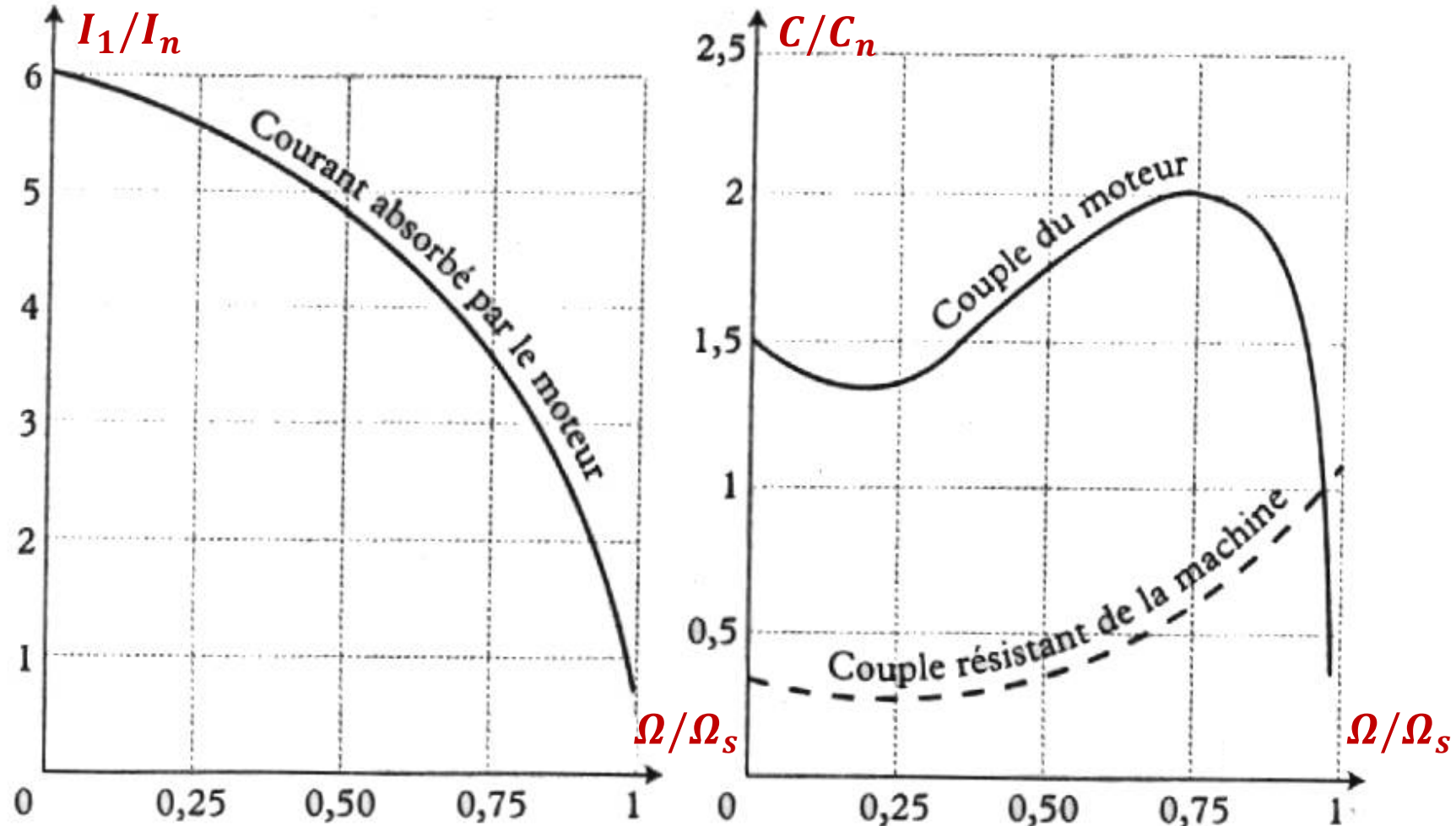
Pour réduire le courant absorbé lors du démarrage:

- ✓ Réduire la valeur efficace de la tension d'alimentation V (démarrage statorique, par autotransformateur ou démarrage étoile-triangle);
- ✓ Augmenter la résistance rotorique R (moteur à rotor bobiné).

Remarque 2: Si on utilise un variateur ou un démarreur, c'est ce dernier qui adapte les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant

Machine asynchrone triphasée

□ Caractéristiques $I(\Omega)$ et $C(\Omega)$:

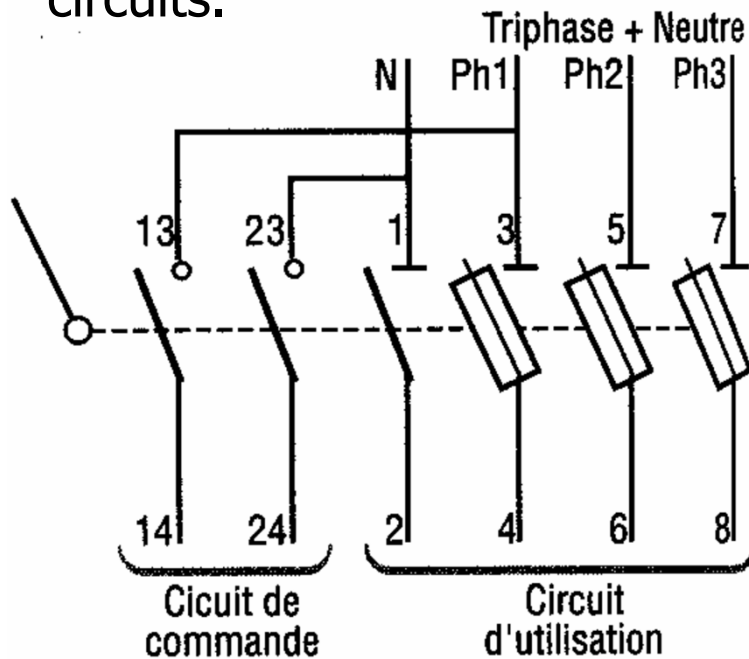


Remarque 3: Pour réaliser un départ-moteur de façon correcte, un certain nombre de dispositifs de sécurité et de commande est nécessaire:

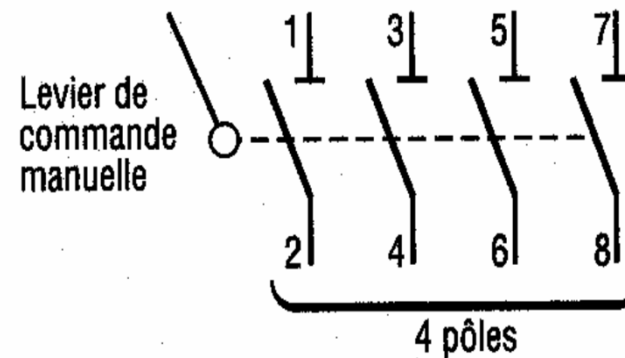
Machine asynchrone triphasée

❑ Sectionneur porte fusibles:

- Permet d'isoler le réseau au départ des équipements pour effectuer des opérations de maintenance, de dépannage ou de modification sur les circuits électriques;
- Dans la plupart des cas il comporte des fusibles de protection contre les courts-circuits.



Sectionneur porte fusibles



Sectionneur Simple

Machine asynchrone triphasée

□ Contacteur:

Appareil de commande capable d'établir ou d'interrompre le passage de l'énergie électrique (commandé par l'alimentation d'une bobine de commande)

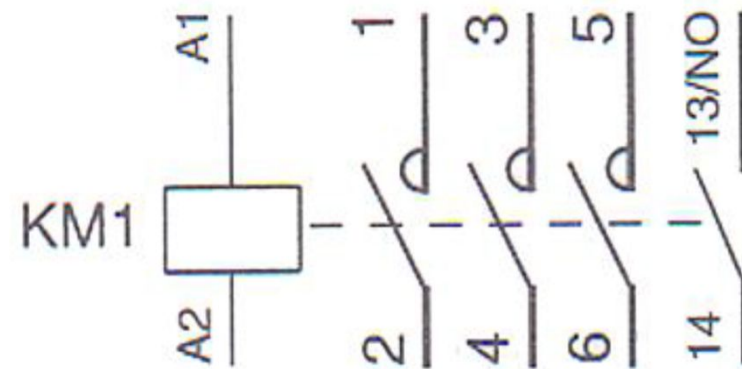
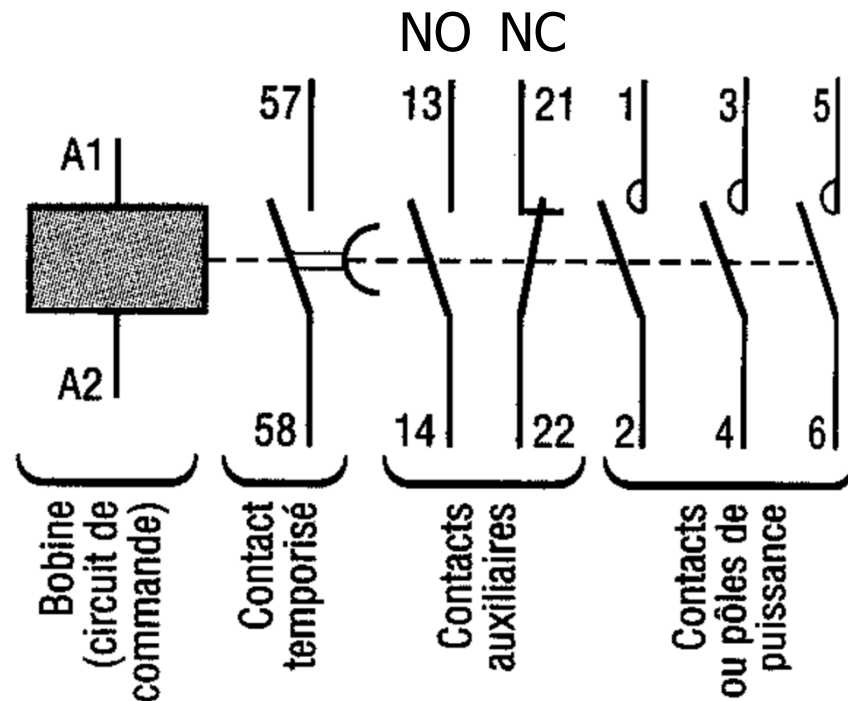


Sa constitution est comme suit:

- Des pôles principaux de puissance;
- Un contact auxiliaire de commande (avec possibilité d'ajouter au contacteur un bloc de contacts auxiliaires instantanés ou temporisés);

Machine asynchrone triphasée

- Une armature fixe et une autre mobile;
- Un ressort de rappel;
- Un circuit magnétique;
- Une bobine de commande du contacteur. Si la bobine est alimentée elle attire l'armature mobile pour actionner les pôles de puissance; Si elle n'est pas alimentée, un ressort ramène les contacts à leur position de repos.

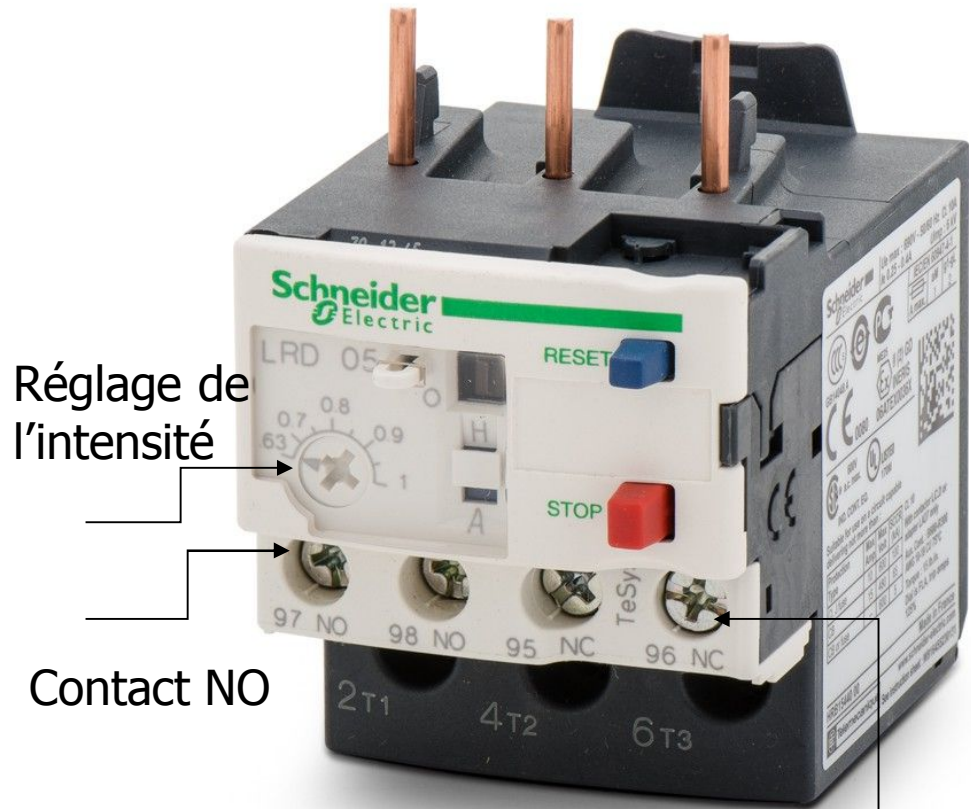


Contacteur tripolaire + un contact NO

Machine asynchrone triphasée

❑ Relais thermique:

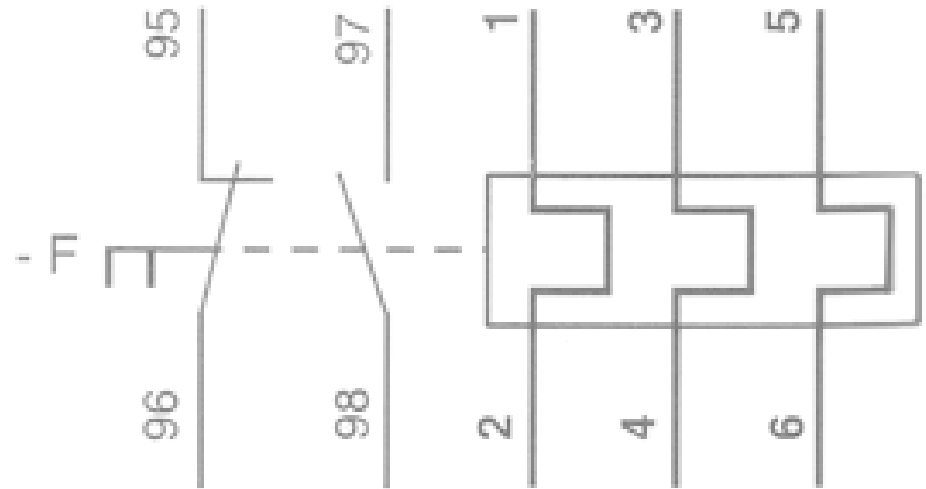
Appareil de protection contre les surcharges prolongées (élévation anormale du courant consommé par le ou les récepteurs: 1 à $3 I_n$).



Réglage de l'intensité

Contact NO

Contact NC



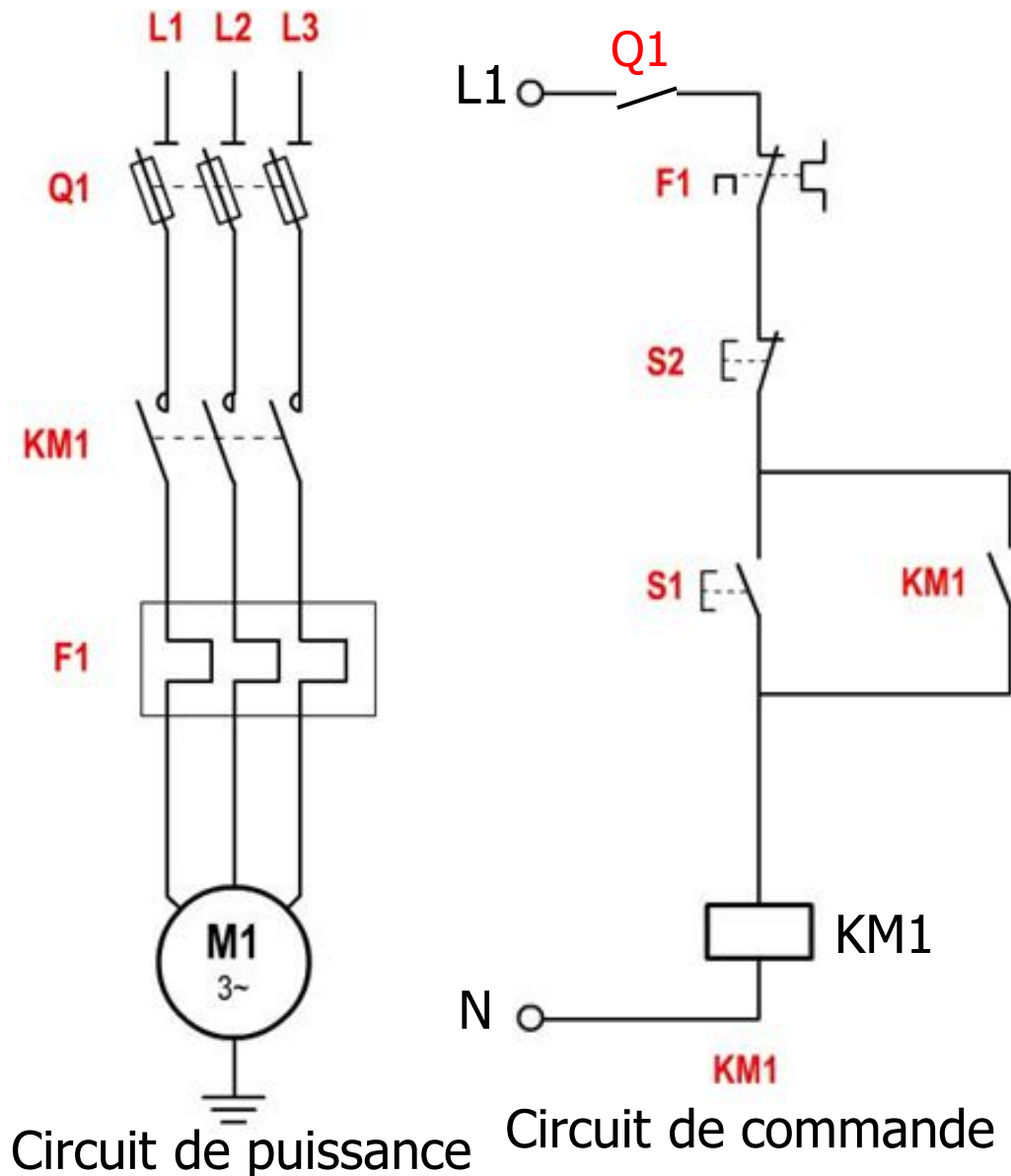
Circuit de commande

Circuit de puissance

Machine asynchrone triphasée

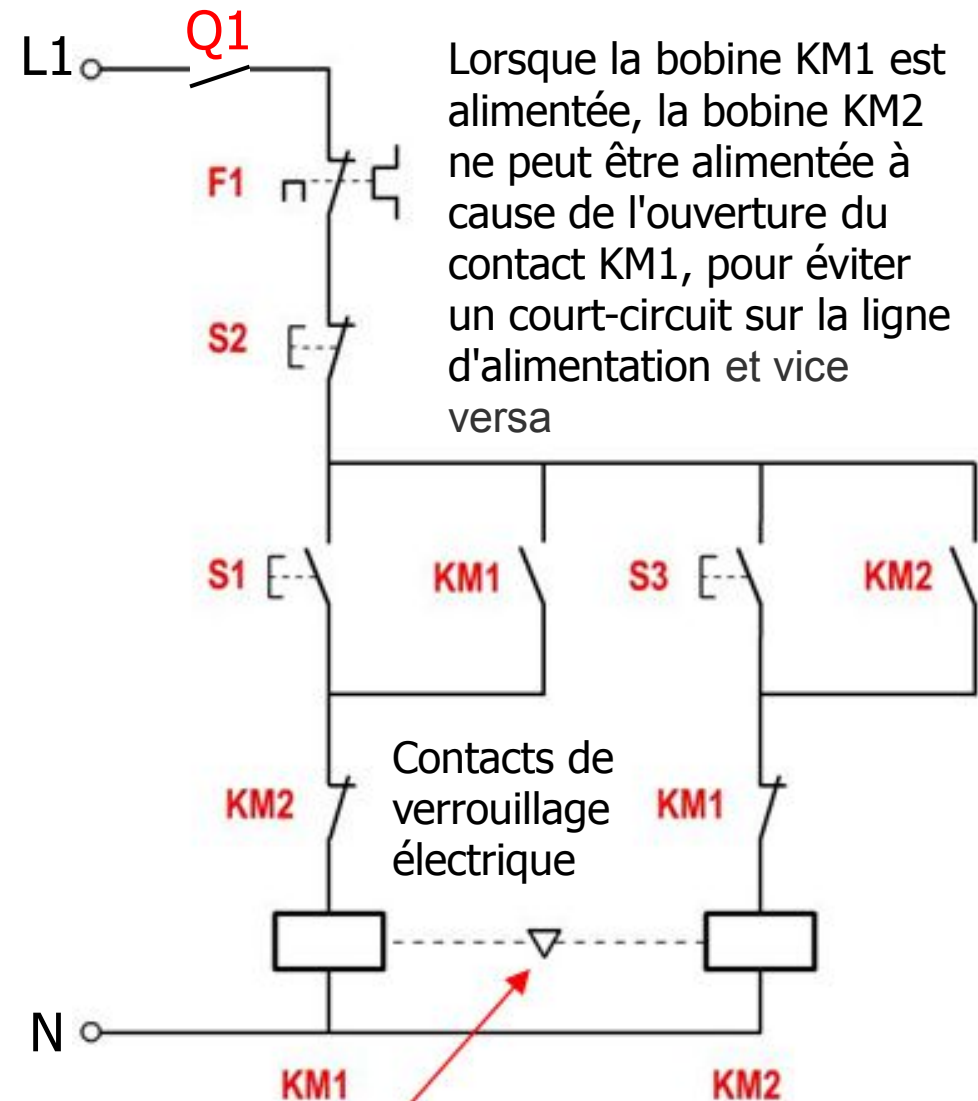
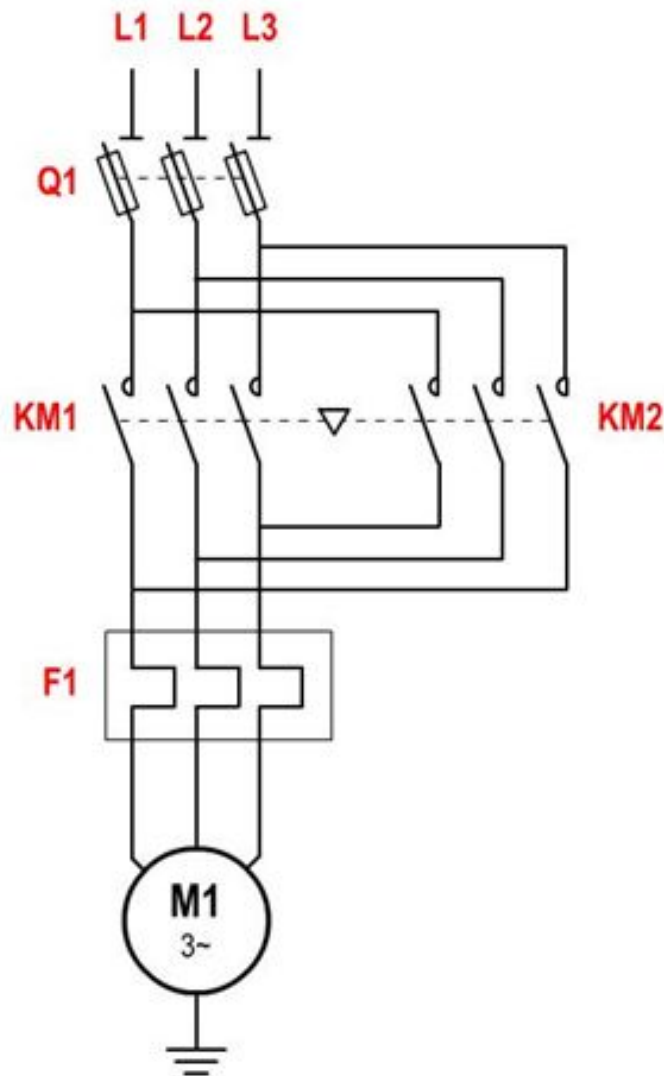
L'alimentation de la bobine KM1 du contacteur est assurée par le « circuit de commande »

- Une impulsion sur le bouton poussoir S1 (MARCHE) enclenche la bobine du contacteur KM1 qui s'autoalimente (par son contact auxiliaire); ce qui ferme les contacts de puissance; le moteur tourne.
- Si S1 est relâché le contact KM1 du circuit de commande maintient l'alimentation de la bobine du contacteur (auto maintien);
- Une impulsion sur le bouton poussoir S2 (ARRET) provoque l'ouverture du circuit de commande; ce qui ouvre les contacts de puissance; le moteur s'arrête.



Machine asynchrone triphasée

Schéma de démarrage direct deux sens de rotation: inverser deux des trois phases du circuit d'alimentation.



Lorsque la bobine KM1 est alimentée, la bobine KM2 ne peut être alimentée à cause de l'ouverture du contact KM1, pour éviter un court-circuit sur la ligne d'alimentation et vice versa

Contacts de verrouillage électrique

Verrouillage mécanique qui empêche un contacteur de se fermer si l'autre est déjà fermé

Machine asynchrone triphasée

6.2. Démarrage étoile-triangle:

- Le moteur est destiné à fonctionner avec un couplage en triangle sur le réseau;

Exemple:

Un moteur 400V/690V sur un réseau 230V/400V

On dispose pour ce démarreur de trois contacteurs:

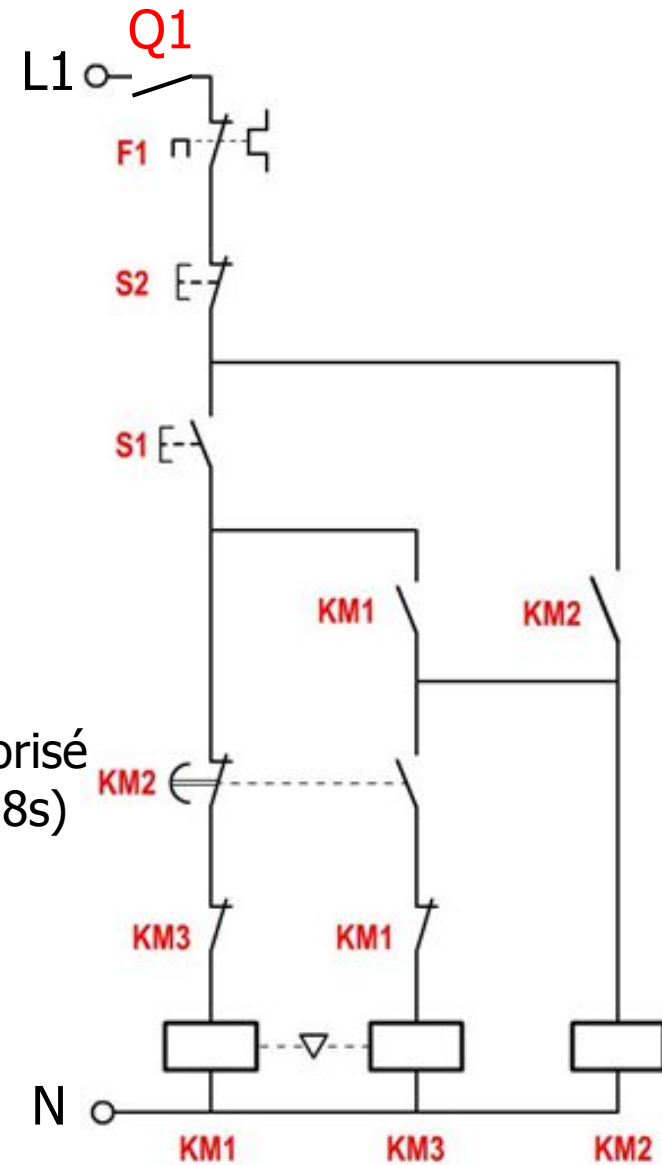
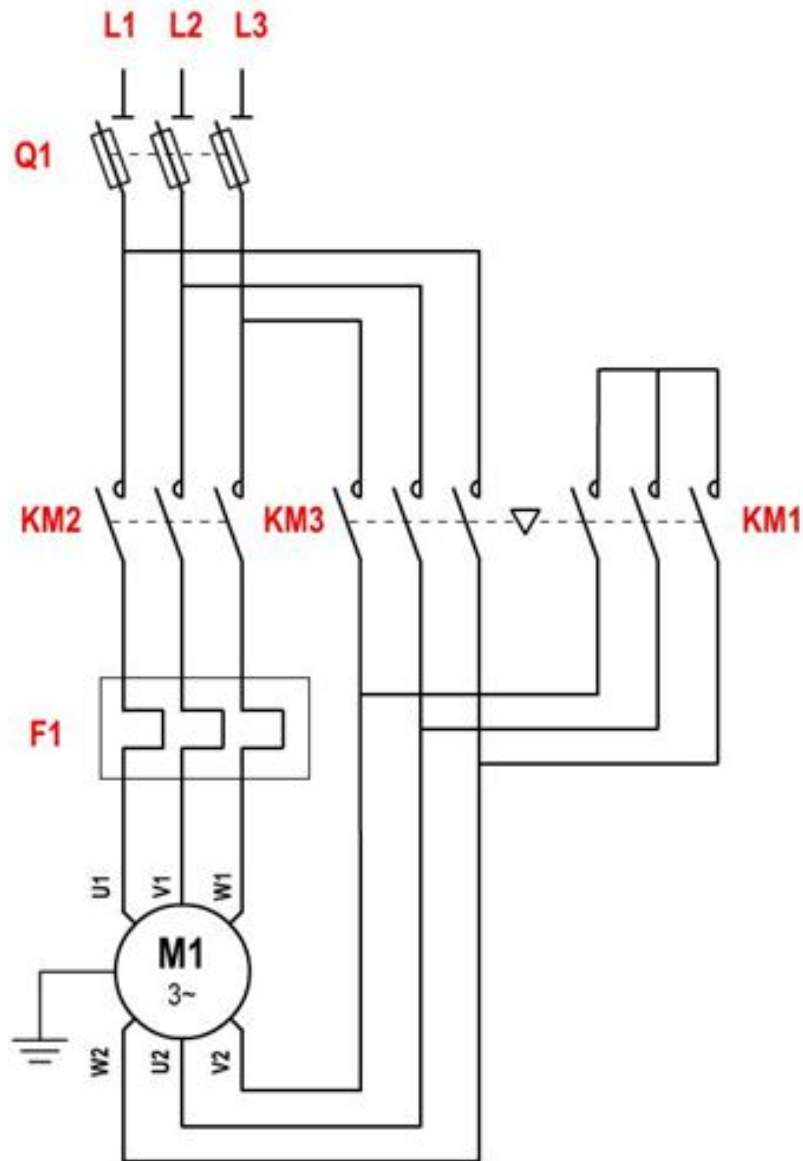
- ✓ KM1 qui couple le moteur en étoile au début du démarrage;
- ✓ KM3 qui le couple en triangle à la fin du démarrage;
- ✓ KM2, contacteur de ligne, dont le rôle est de commander le moteur.

Le démarrage s'effectue en deux temps :

- **1^{er} temps** : Pendant le démarrage, le stator est couplé en étoile à l'aide de KM1 (temps nécessaire pour que la vitesse du moteur atteigne environ 80% de sa vitesse nominale);
- **2^{ème} temps** : À la fin du démarrage (après temporisation), le stator est couplé en triangle à l'aide de KM3. l'alimentation du moteur est maintenue par le contacteur de ligne KM2).

Machine asynchrone triphasée

Circuit de puissance et circuit de commande:



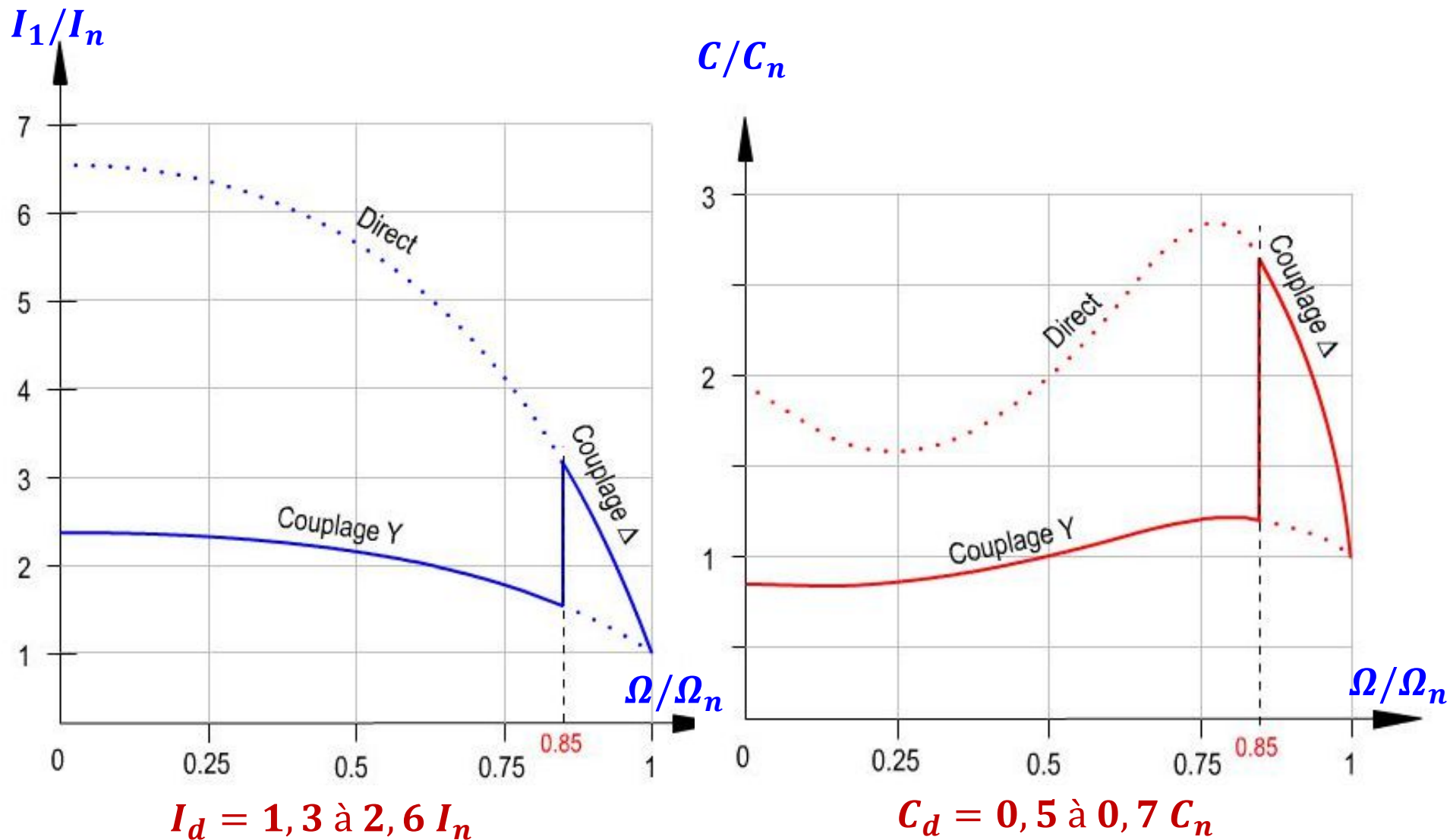
Contact temporisé
au repos (3 à 8s)

Machine asynchrone triphasée

- Pendant le démarrage, chaque enroulement est soumis à la tension simple $V = U/\sqrt{3}$;
- Le courant de ligne appelé et le couple sont divisés par 3, $I_Y = I_{\Delta}/3$; $C_Y = C_{\Delta}/3$, par rapport à un démarrage direct;
- En raison de la diminution du couple de démarrage, ce démarrage convient pour les moteurs de puissance moyennes ($P < 50KW$, machines-outils, machines à bois) démarrant à vide (Ventilateur,...) ou avec des couples résistants très faibles;
- Il faut donc que le couple obtenu au démarrage reste supérieur au couple résistant;
- Mais ce démarrage conduit à un brutal régime transitoire lors du passage d'étoile à triangle;
- Il y a coupure de l'alimentation entre les positions étoile et triangle.

Machine asynchrone triphasée

Caractéristiques pur un démarrage étoile-triangle:



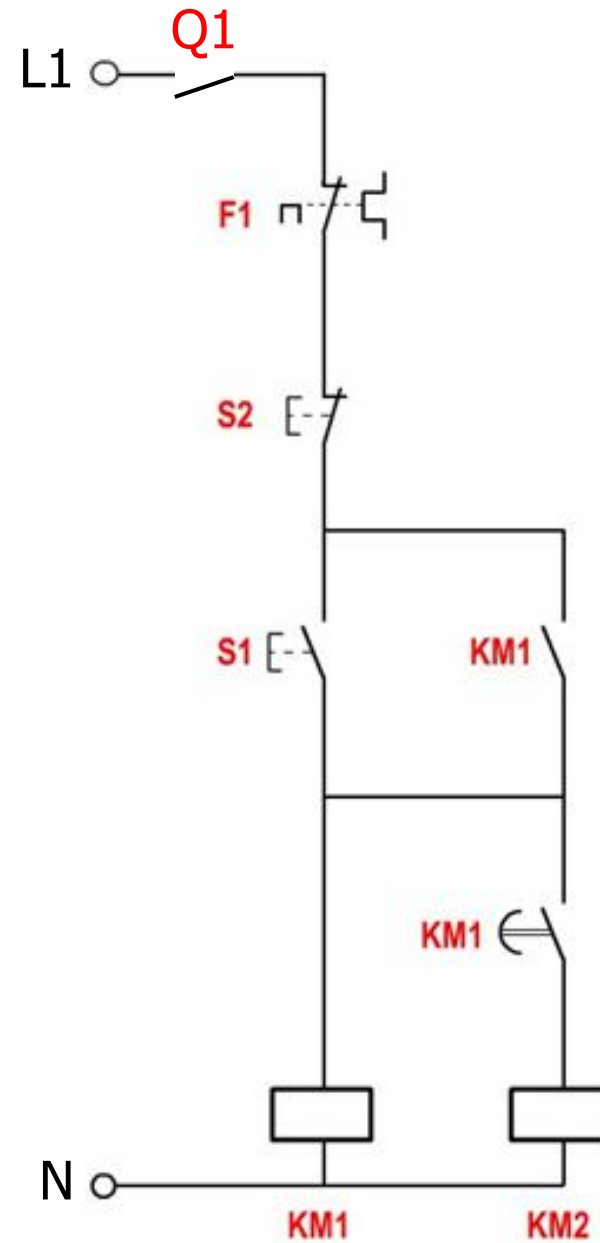
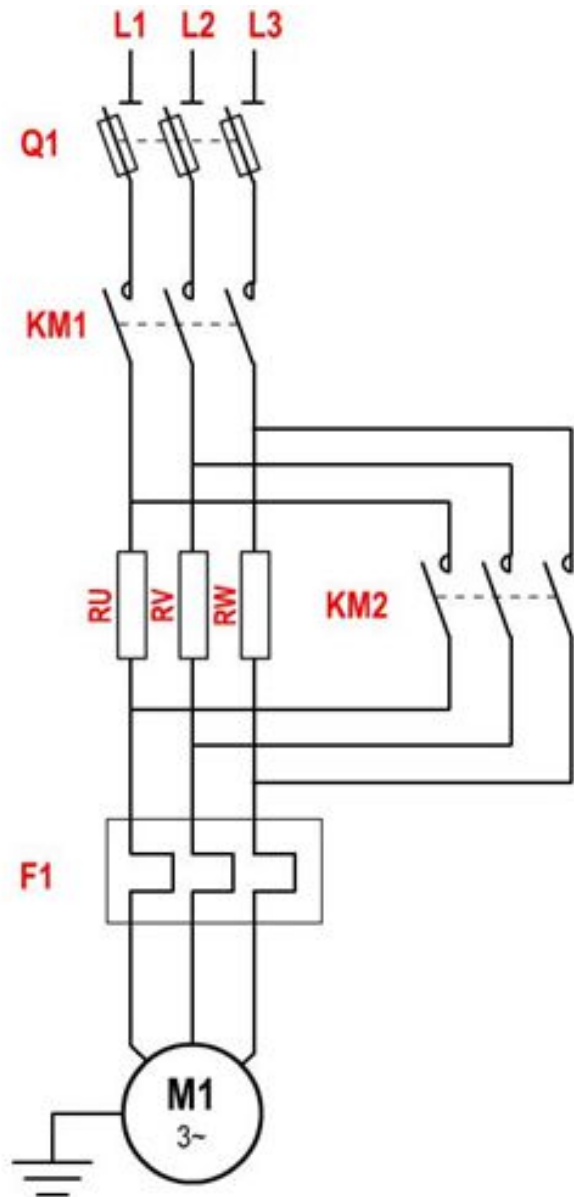
6.3. Démarrage statorique:

On réduit la tension statorique en insérant, lors du démarrage, des résistances en série avec les enroulements du stator:

- **1^{er} temps:** alimenter le moteur à travers les trois résistances RU, RV et RW. Seul KM1 est utilisé;
- **2^{ème} temps:** Il faut ensuite, tout en continuant d'alimenter le moteur à l'aide de KM1, utiliser KM2 pour éliminer les trois résistances du circuit de puissance;
- Ce démarrage convient aux machines dont le couple de démarrage est plus faible que le couple nominal;
- La caractéristique de couple est sensiblement identique avec un démarrage étoile triangle. Par contre le courant au moment du démarrage reste élevé.
- Si au démarrage la tension appliquée au moteur est réduite à $U/2$. Le courant I_d a été divisé par 2 et le couple C_d par 4;
- Il n'y a pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.

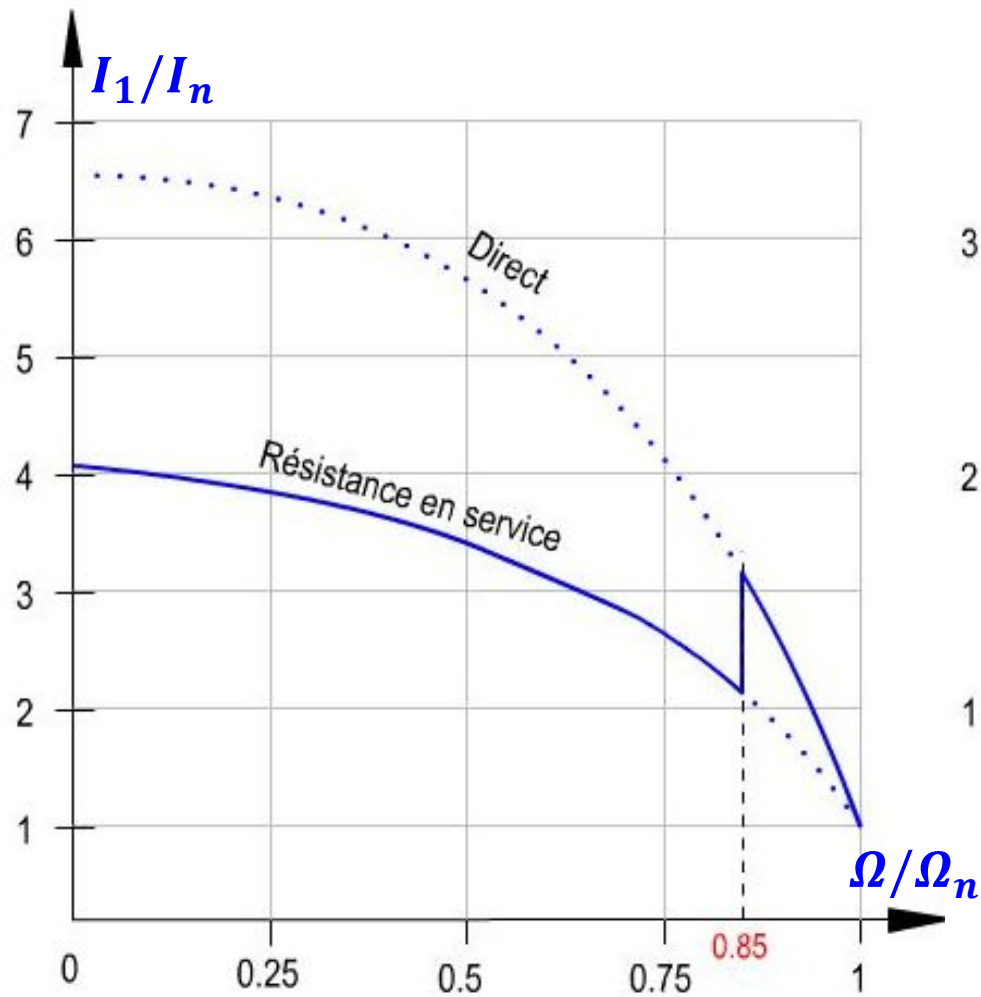
Machine asynchrone triphasée

Circuit de puissance et de commande:

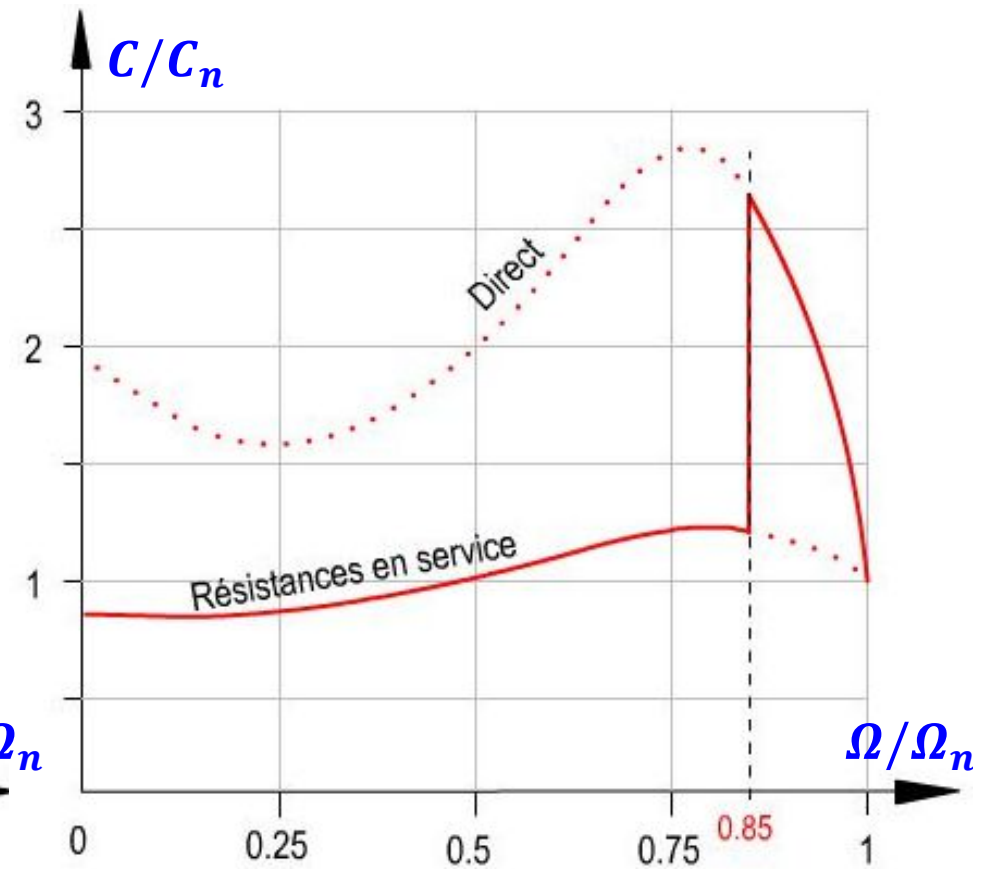


Machine asynchrone triphasée

- Appel du courant plus important qu'en étoile-triangle 4 à 5 fois I_n .
- Le couple de démarrage est diminué par rapport au démarrage direct 0,75 C_n



$$I_d = 4,2 I_n$$



$$C_d = 0,75 C_n$$

Machine asynchrone triphasée

6.4. Démarrage rotorique:

- Le démarrage rotorique a pour principe de limiter les courants rotoriques circulant dans l'induit d'un moteur à rotor bobiné;
- Le moteur se comportant alors comme un transformateur, le courant de ligne sera limité aussi;
- on peut utiliser un rhéostat rotorique qui agit sur le glissement: si R_2 augmente, on peut alors en plus augmenter le couple au démarrage.

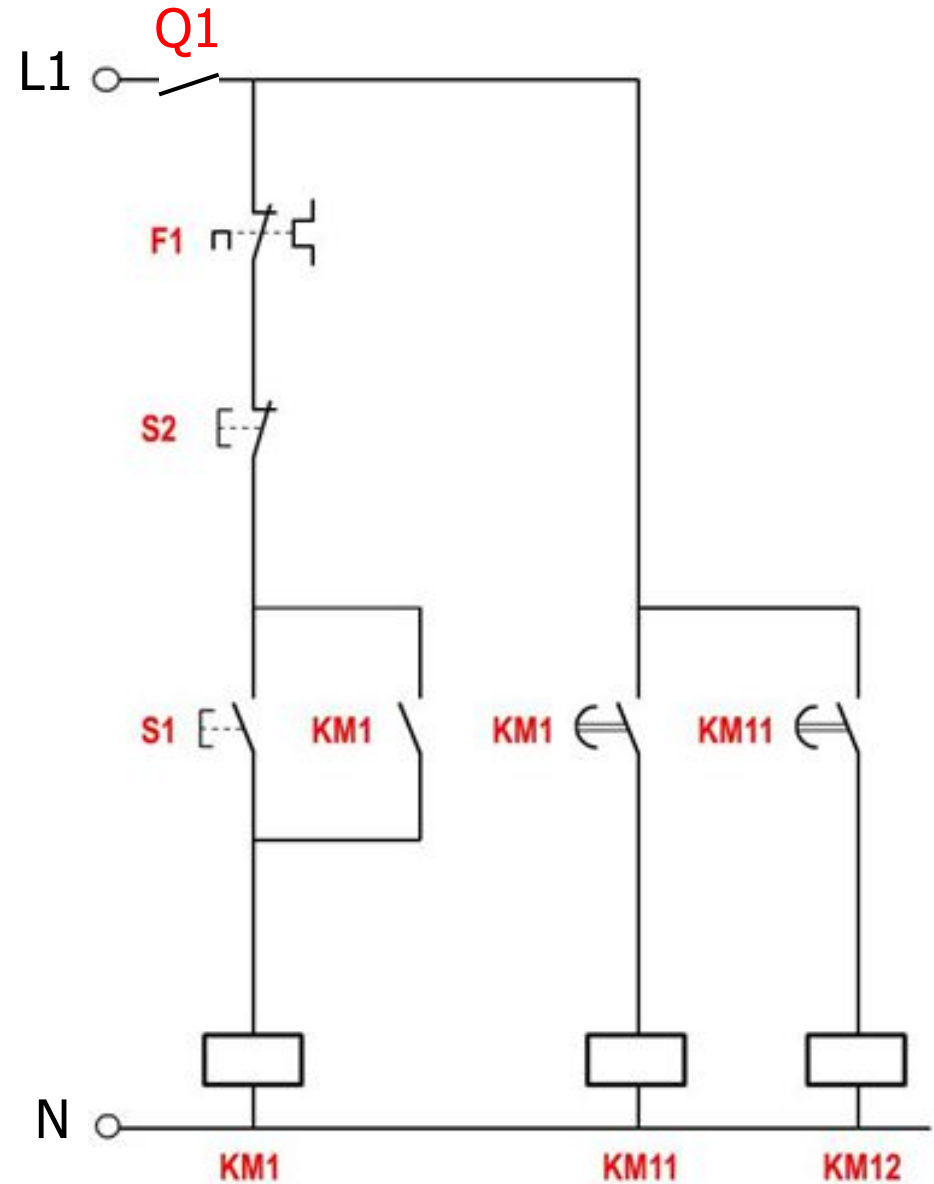
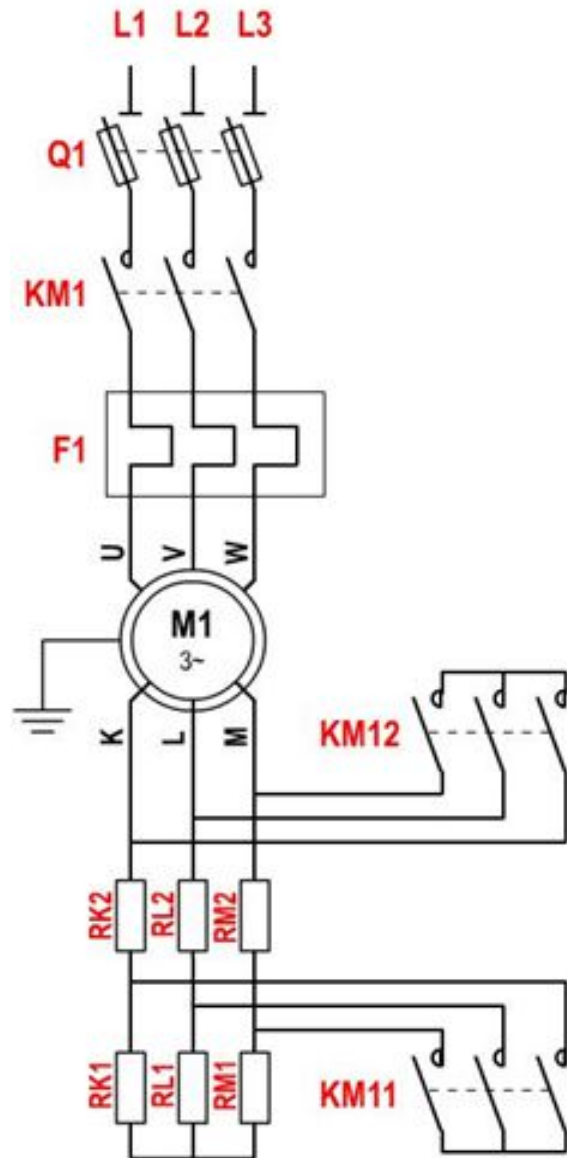
Exemple:

Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.

- **1^{er} temps:** On alimente le moteur en limitant les courants rotoriques au maximum par insertion des deux jeux de résistances dans le circuit d'induit. Il faut donc alimenter KM1 seul;
- **2^{ème} temps:** On élimine le premier jeu de trois résistances à l'aide du contacteur KM11;
- **3^{ème} temps :** On élimine le deuxième jeu de trois résistances à l'aide du contacteur KM12;
- Le démarrage rotorique est utilisé en général pour les machines de puissances ($P > 100KW$), démarrant en charge ou à démarrage progressif (Compresseurs rotatifs à piston, pompes,...).

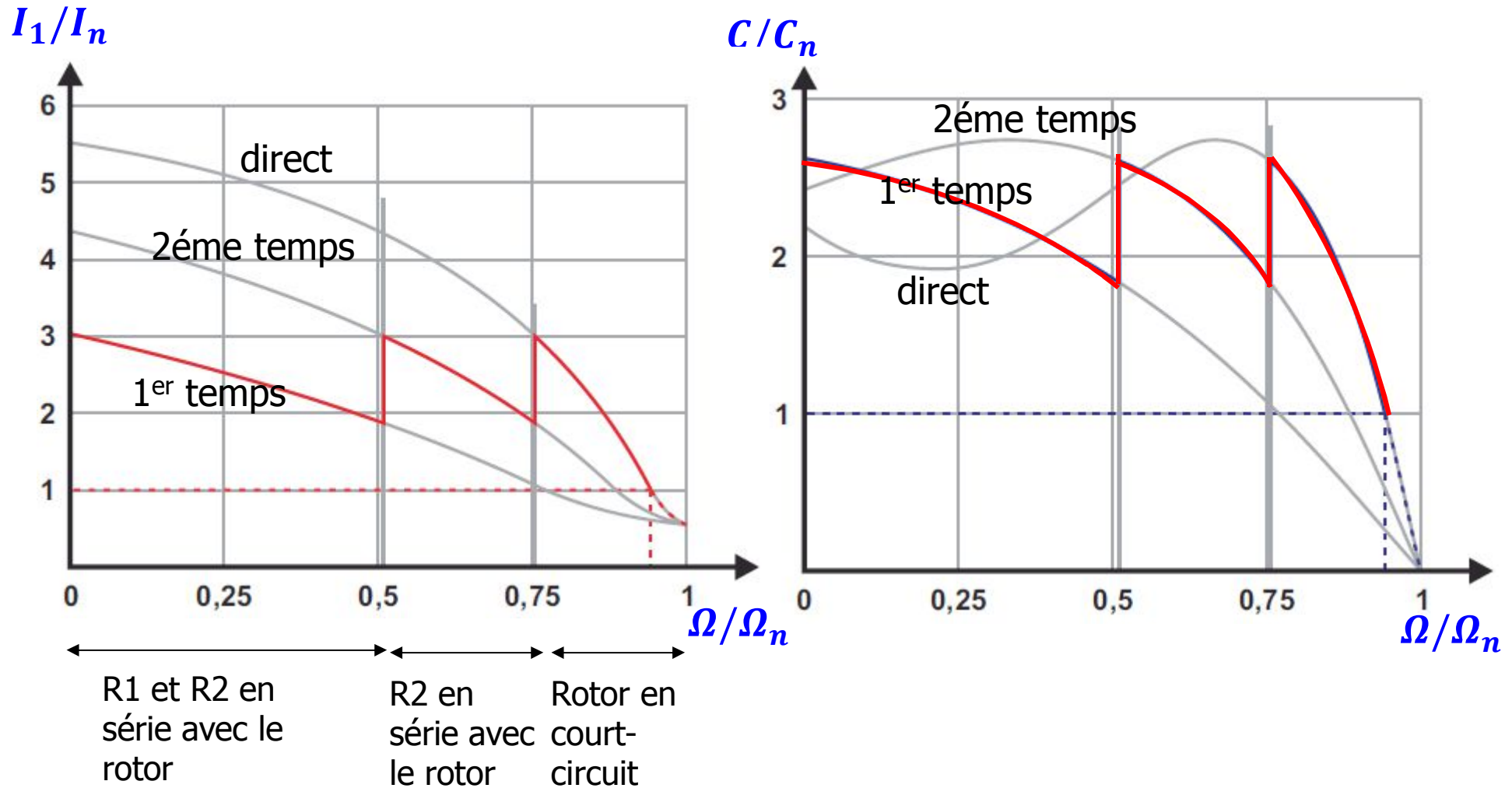
Machine asynchrone triphasée

Circuit de puissance et de commande:



Machine asynchrone triphasée

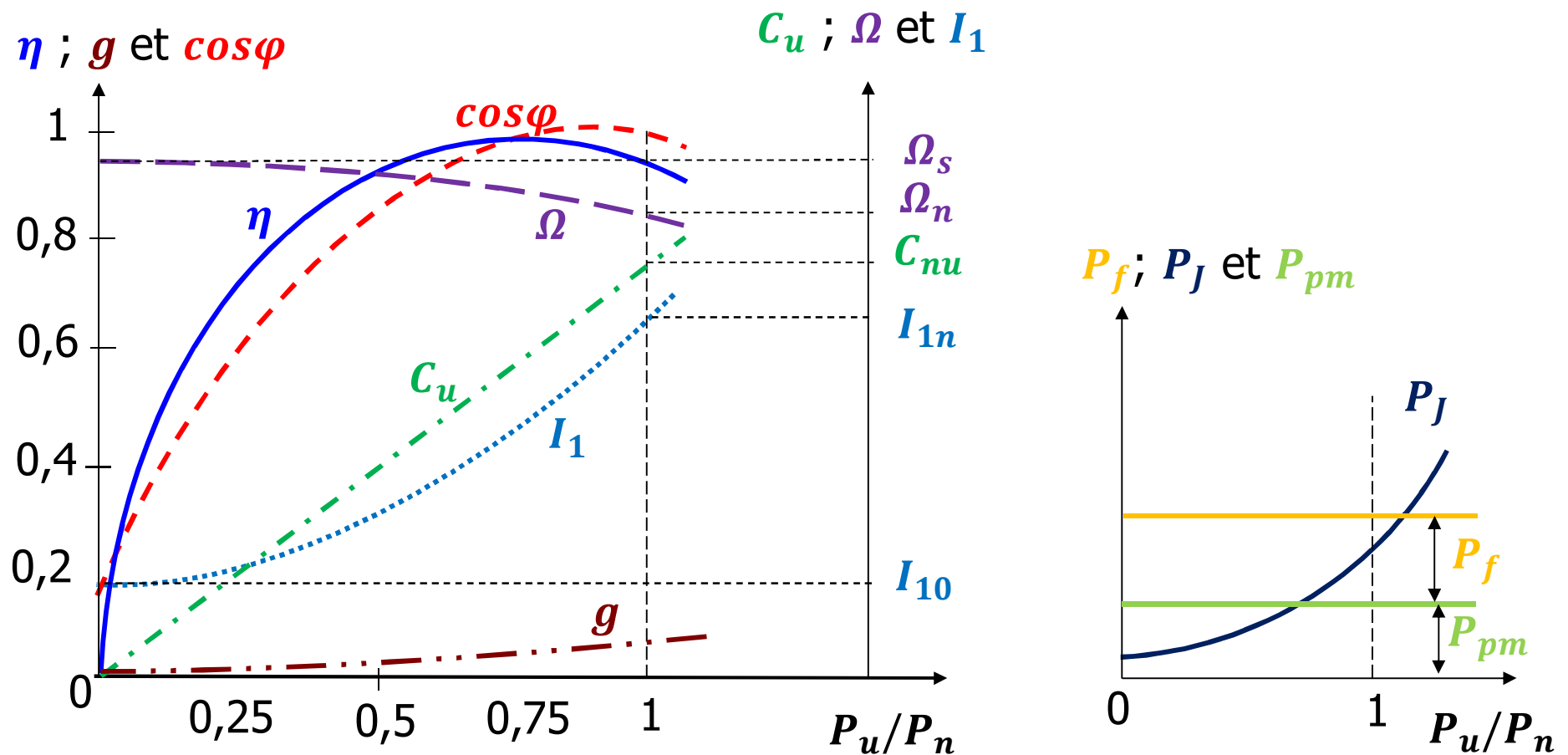
Ce procédé de démarrage permet en plus de la réduction du courant de démarrage, d'une augmentation du couple de démarrage.



Machine asynchrone triphasée

7. Courbes caractéristiques:

Les caractéristiques des différentes grandeurs tracées en fonction de la puissance utile P_u :



Machine asynchrone triphasée

- Le facteur de puissance $\cos\varphi$ part d'une valeur faible à vide (de l'ordre de 0,1, puissance essentiellement réactive pour la magnétisation). Pour le fonctionnement nominal, il est de 0,7 à 0,95 suivant la puissance du moteur;
- La vitesse Ω décroît quand la charge augmente. Toutefois la variation est faible puisqu'elle est seulement de 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. Le glissement g des gros moteurs est plus faible encore; il augmente avec la charge. À vide ($g = 0$; $\Omega = \Omega_s$), il croît presque linéairement;
- Le rendement η , nul à vide ($P_u = 0$), prend rapidement une valeur proche de son rendement nominal (0,7 à 0,9 suivant la puissance du moteur. le rendement est bon à partir de la demi-charge. Il est maximal au voisinage de la puissance nominale;
- Le courant absorbé I_1 part d'une valeur I_{10} relativement forte (30 à 50% de I_{1n} suivant la puissance du moteur), puis augmente avec la charge;
- Le couple utile C_u est à peu près presque proportionnel à P_u , puisque $C_u = P_u/\Omega = P_u/(1 - g)\Omega_s$ et que g faible dans la partie utile de $C(\Omega)$, où l'on trace les caractéristiques;
- Les pertes fer sont proportionnelle à f et B_{max}^2 , donc au carrée de la tension; les pertes fer sont constantes à la tension nominale;
- Les pertes mécaniques dépendent de Ω qui varie avec la charge, sont donc quasiment constantes.

Machine asynchrone triphasée

8. Plaque signalétique:

Les valeurs des grandeurs ($\cos\varphi$, η , C_u , I) au point de fonctionnement nominal se déduisent de la plaque signalétique du moteur:

The image shows a technical nameplate for a Leroy-Somer motor. The nameplate contains the following information:

- Brand: LEROY SOMER
- Model: MOT. 3 ~ FLSB 180 M
- Serial Number: N° 596059Z0001
- Weight: 208 kg
- IP 55
- Insulation Class: I cl. F
- Temperature: 40 °C
- Service Factor: S3
- Efficiency: 40 %
- Speed: 6 d/h

V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 230	50	1427	17	0.88	57
Y 400	50	1427	17	0.88	33

Additional information on the nameplate:

- ROTOR: I = 42A U = 250V
- GRAISSE ESSO UNIREX N3
- DE: 6310 C3, 15 cm³
- NDE: 6310 C3, 11000 h

Callout boxes point to the following data:

- Couplage adopté**: Points to the Δ 230 and Y 400 rows.
- Vitesse nominale**: Points to the 1427 min⁻¹ value.
- Intensité du courant en ligne**: Points to the 57 A and 33 A values.
- Facteur de Puissance**: Points to the 0.88 cos φ values.
- Puissance utile**: Points to the 17 kW values.

Couplage:

- Si on travaille sur le réseau 230V entre phases, le stator est couplé en triangle;
- Si on travaille sur le réseau 400V entre phases, le stator est couplé en étoile.

Machine asynchrone triphasée

- La vitesse de synchronisme est:

$$n_s = 1500 \text{tr/min}$$

- Le nombre de paires de pôles est:

$$p = 2$$

- Le glissement au point nominal est:

$$g_n = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1427}{1500} = 4,9\%$$

- La puissance électrique P_a absorbée au point nominal:

- couplage en triangle:

$$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi = \sqrt{3} \times 230 \times 57 \times \cos(0,88) \approx 20 \text{kW}$$

- couplage en étoile:

$$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi = \sqrt{3} \times 400 \times 33 \times \cos(0,88) \approx 20 \text{kW}$$

- Le rendement au point nominal:

$$\eta = \frac{P_{un}}{P_{an}} = \frac{17}{20} = 0,85$$

- Le couple utile au point nominal:

$$C_{un} = \frac{P_{un}}{\Omega_n} = \frac{60 \times 17000}{2\pi \times 1427} = 114 \text{Nm}$$

Machine asynchrone triphasée

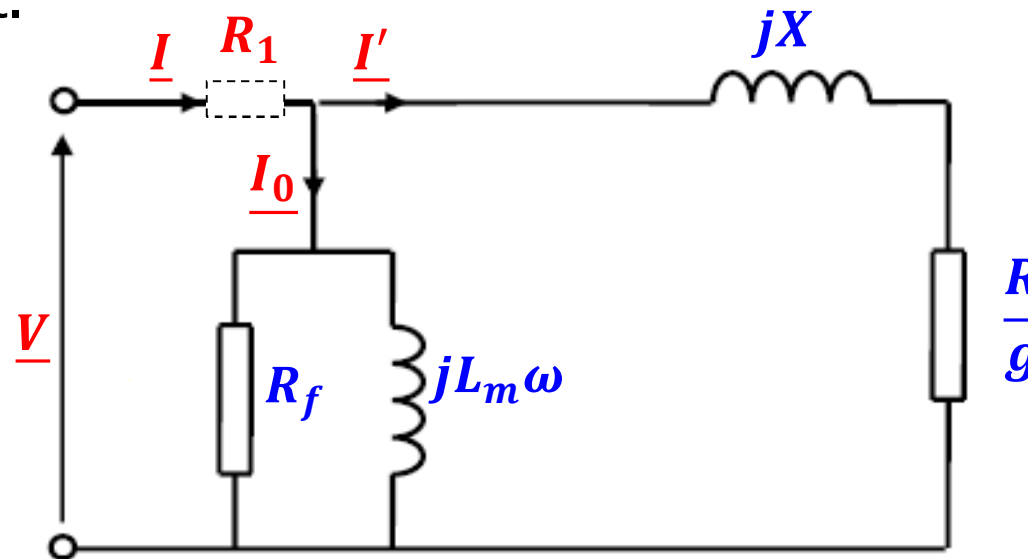
9. Essais de la machine asynchrone:

Permettent de mesurer les éléments du modèle équivalent monophasé et ainsi de comprendre et de prévoir le comportement de la machine asynchrone.

Pour trouver les valeurs des éléments, on effectue 3 essais:

- un essai en continu pour mesurer la résistance statorique R_1 par phase;
- un essai à vide (ou mieux encore, à vitesse de synchronisme) pour obtenir les pertes dans le fer (dans R_f) et l'inductance magnétisante X_m ;
- un essai à rotor bloqué pour déterminer la résistance rotorique R et la réactance de fuite X au rotor.

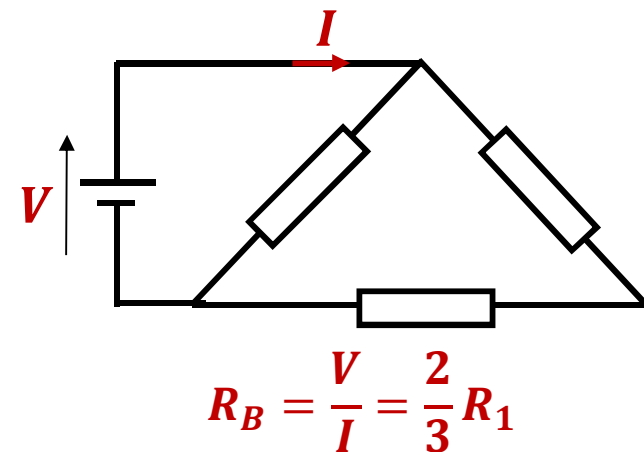
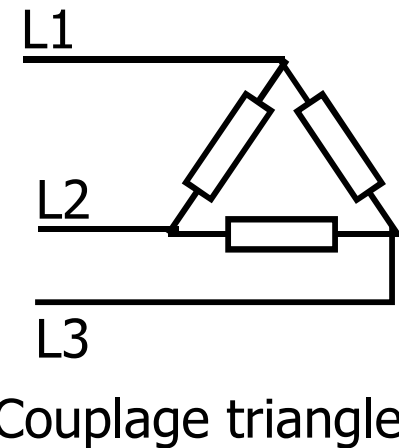
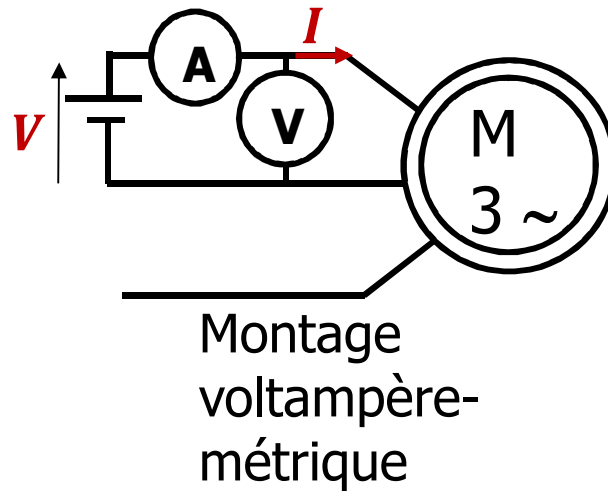
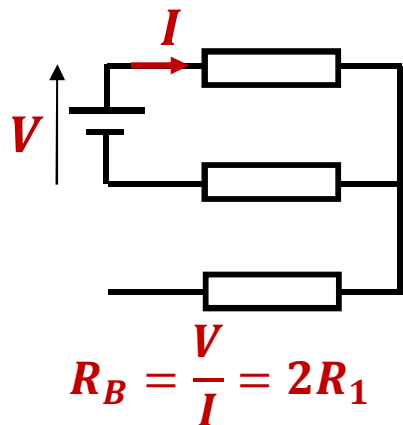
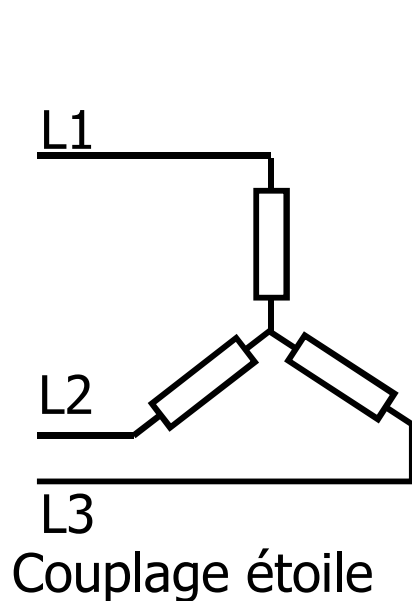
En négligeant l'inductance de fuites au stator, on se ramène au schéma monophasé équivalent.



Machine asynchrone triphasée

□ Mesure de la résistance d'une phase du stator:

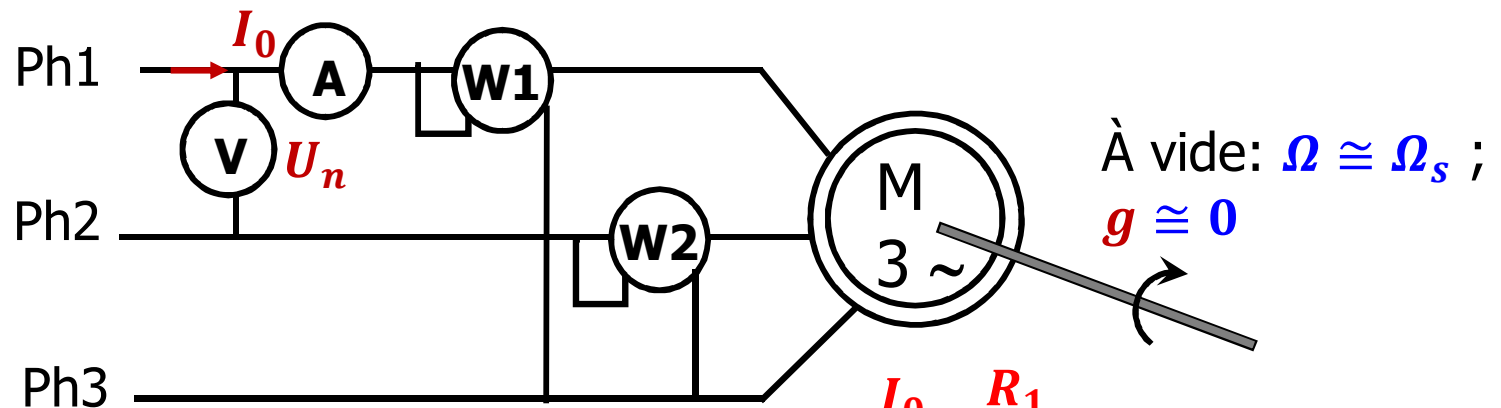
Essai à courant continu: On mesure sous basse tension, la résistance R_B entre deux bornes du stator (sans dépasser I_n)



Machine asynchrone triphasée

□ Essai à vide avec une machine désaccouplée:

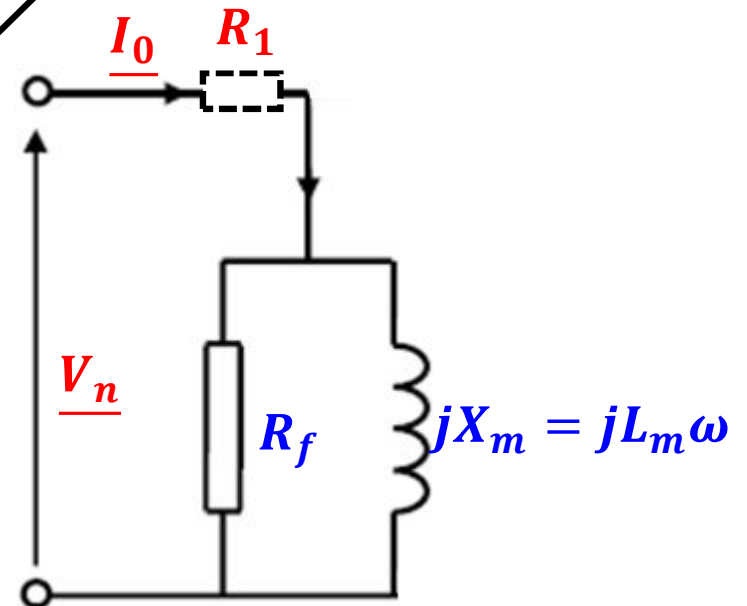
- On fait tourner le moteur à vide alimenté sous sa tension nominale U_n .
- **À vide** : la vitesse de rotation de l'arbre Ω est très proche de la vitesse de synchronisme Ω_s et le glissement g est pratiquement nul (les frottements sont faibles).



On mesure:

- La tension statorique nominale U_n ;
- Le courant en ligne à vide I_0 ;
- La puissance active $P_0 = W_1 + W_2$ et réactive $Q_0 = \sqrt{3}(W_1 - W_2)$;

Au synchronisme $\Omega = \Omega_s$; $g = 0$ et R/g est infinie, le schéma monophasé équivalent se simplifie:



Machine asynchrone triphasée

- Détermination de X_m :

✓ Si on néglige la tension aux bornes de R_1 :

$$X_m = 3 \frac{V_n^2}{Q_0} \quad ; \quad U_n = \sqrt{3} V_n$$

- Détermination de R_f :

✓ À vide, le moteur ne consomme que les pertes magnétiques (fer) et mécaniques, auxquelles se rajoute une certaine quantité de pertes Joule statoriques, dues au fait que le courant I_0 absorbé à vide n'est pas négligeable:

$$P_0 = P_{fer} + P_{JS} + P_{pm}$$

soit:

$$P_{fer} + P_{pm} = P_0 - P_{JS} = P_0 - \frac{3}{2} R_B I_0^2$$

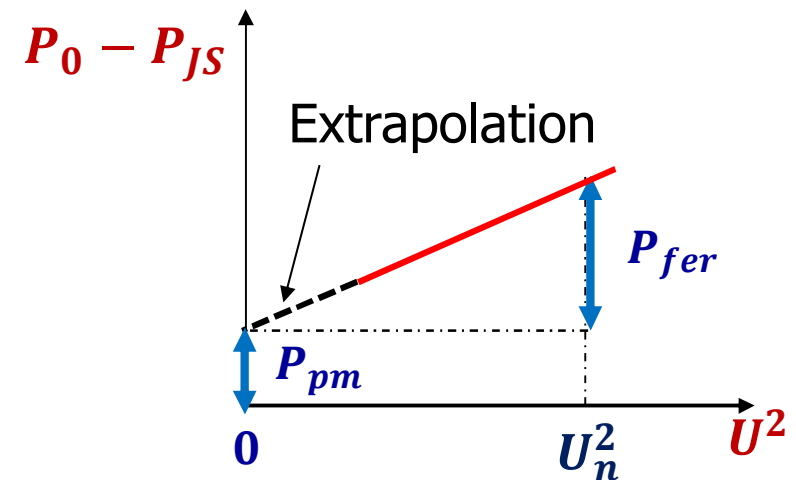
- ✓ Les pertes fer P_{fer} au stator sont proportionnelles à U^2 . Elles sont nulles pour $U = 0$;
- ✓ Si on alimente le moteur à vide sous tension variable U , sa vitesse Ω varie peu. Les pertes mécaniques P_{pm} sont quasiment constantes puisqu'elles dépendent de Ω ;

Machine asynchrone triphasée

- ✓ On peut considérer que les pertes P_{pm} sont les mêmes en charge, puisque Ω diffère peu entre la marche à vide et en charge (g faible). Il est possible de séparer les pertes fer statoriques P_{fer} des pertes mécaniques P_{pm} par un essai à vide sous tension d'alimentation U variable.
- ✓ On fait varier la tension efficace U entre phases et on trace $P_0 - P_{JS} = f(U^2)$. C'est pratiquement une droite que l'on prolonge jusqu'à l'origine pour obtenir P_{pm} et P_{fer} .

- Si on néglige la chute de tension aux bornes de R_1 :

$$R_f = 3 \frac{V_n^2}{P_{fer}}$$



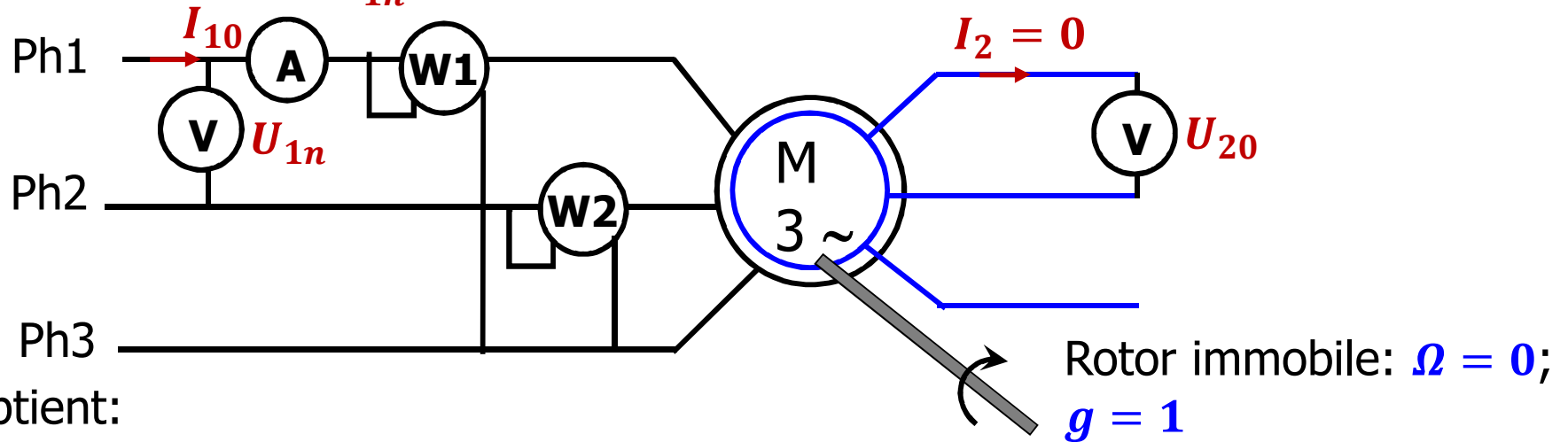
Remarques:

- On peut admettre l'équipartition des pertes: $P_{fer} \approx P_{pm} = \frac{P_0 - \frac{3}{2}R_B I_0^2}{2}$
- La somme $P_C = P_{fer} + P_{pm}$ reste pratiquement constante à $U = cst$ et $\Omega = cst$, appelée pertes constantes ou collectives $P_C = P_0 - \frac{3}{2}R_B I_0^2$.

Machine asynchrone triphasée

Dans le cas d'un moteur à rotor bobiné, on peut déterminer R_f ; X_m et m :

- Le rotor est à vide électriquement $I_2 = 0$, le stator est alimenté sous tension nominale U_{1n} :



On obtient:

- Le rapport de transformation à l'arrêt:

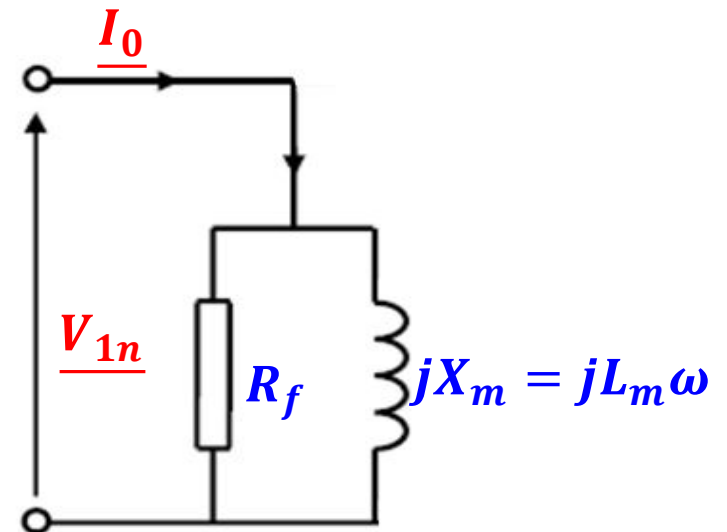
$$m = \frac{U_{20}}{U_{1n}}$$

- La résistance R_f :

$$R_f = 3 \frac{V_n^2}{P_{10}}$$

- La réactance X_m :

$$X_m = 3 \frac{V_n^2}{Q_{10}}$$



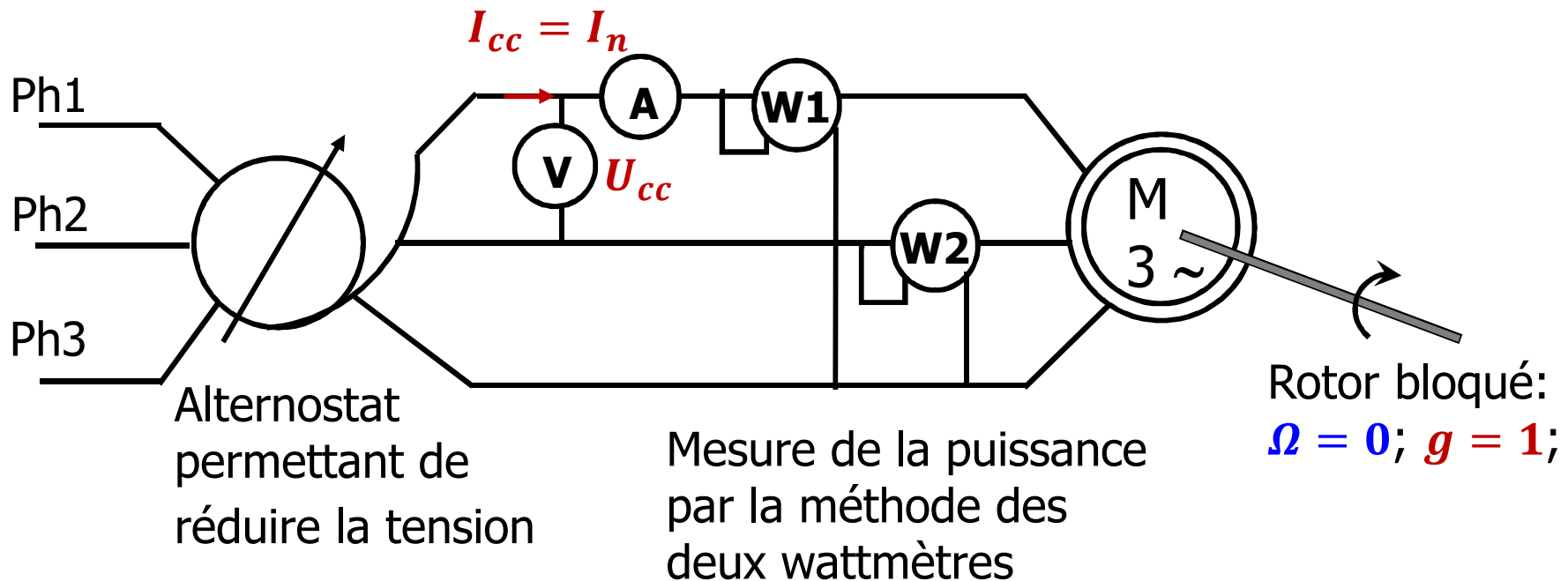
Machine asynchrone triphasée

❑ Essai en court-circuit à rotor bloqué:

Le rotor en court-circuit est bloqué par un frein. On alimente le moteur sous tension réduite U_{cc} (10 à 20% environ de U_n) de telle sorte que le courant statorique appelé I_{cc} soit proche du courant nominal I_n .

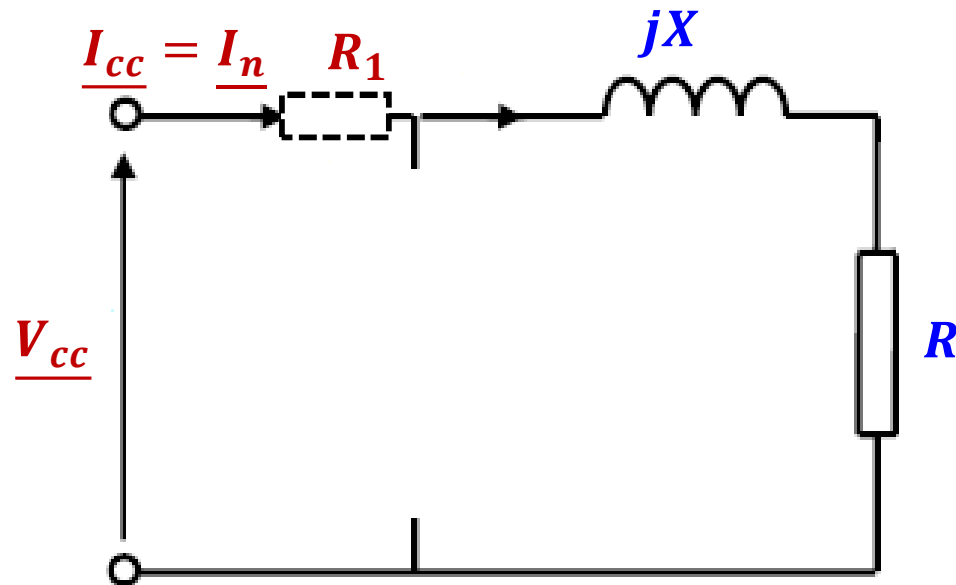
On mesure :

- La tension efficace réduite entre phases U_{cci} ;
- L'intensité efficace du courant en ligne I_{cci} ;
- Les puissances active P_{cc} et réactive Q_{cc} ;



Machine asynchrone triphasée

- Sous tension réduite, les pertes fer dans R_f sont négligeables puisqu'elles sont proportionnelles au carré de la tension d'alimentation;
- Dans ces conditions, la tension aux bornes de la branche de magnétisation (R_f, X_m) est faible, on peut négliger I_{10} devant I_{1n} ;
- Le rotor étant bloqué $g = 1$, le schéma monophasé équivalent se simplifie:



- Cet essai permet de déterminer les valeurs de R et X :

$$R = \frac{P_{cc}}{3I_n^2} - R_1 ; X = \frac{Q_{cc}}{3I_n^2}$$

Machine asynchrone triphasée

□ Exemple de résultats des mesures:

Essai en continu:

Lorsque le moteur est couplé en étoile, on peut mesurer la résistance du stator, en utilisant un montage volt-ampèremétrique: $V = 30,5V$; $I = 2,77A$

- Donc :

$$R_1 = \frac{R_B}{2} = \frac{V}{2I} = 5,5\Omega$$

Essai à vide:

Résultats des mesures:

$U_n = 400V$ (tension sur 1 enroulement statorique : $V = 230V$); $I_0 = 1,66A$
 $P_0 = 186W$; $Q_0 = 1,14kVar$;

- Les pertes Joule statoriques sont:

$$P_{JS} = 3R_1I_0^2 = 45,46W$$

- Si on néglige les pertes mécaniques, les pertes dans le fer sont:

$$P_{fer} = P_0 - P_{JS} = 140,54W$$

- Résistance R_f :

$$R_f = \frac{3V_n^2}{P_{fer}} = 1129\Omega$$

Machine asynchrone triphasée

- Réactance magnétisante X_m :

$$X_m = \frac{3V_n^2}{Q_0} = 139\Omega$$

Remarque:

Une machine asynchrone consomme toujours une puissance réactive $Q > 0$

Essai en court-circuit à rotor bloqué:

Les résultats de cet essai sont les suivants:

- $I_{cc} = 3,18A$ (montage étoile);
- $U_{cc} = 82V$ (tension aux bornes d'un enroulement: $V_{cc} = 47,3V$)
- $P_{cc} = 261W$;
- $Q_{cc} = 369Var$;

- Résistance R :

$$R = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_1 = 3,1\Omega$$

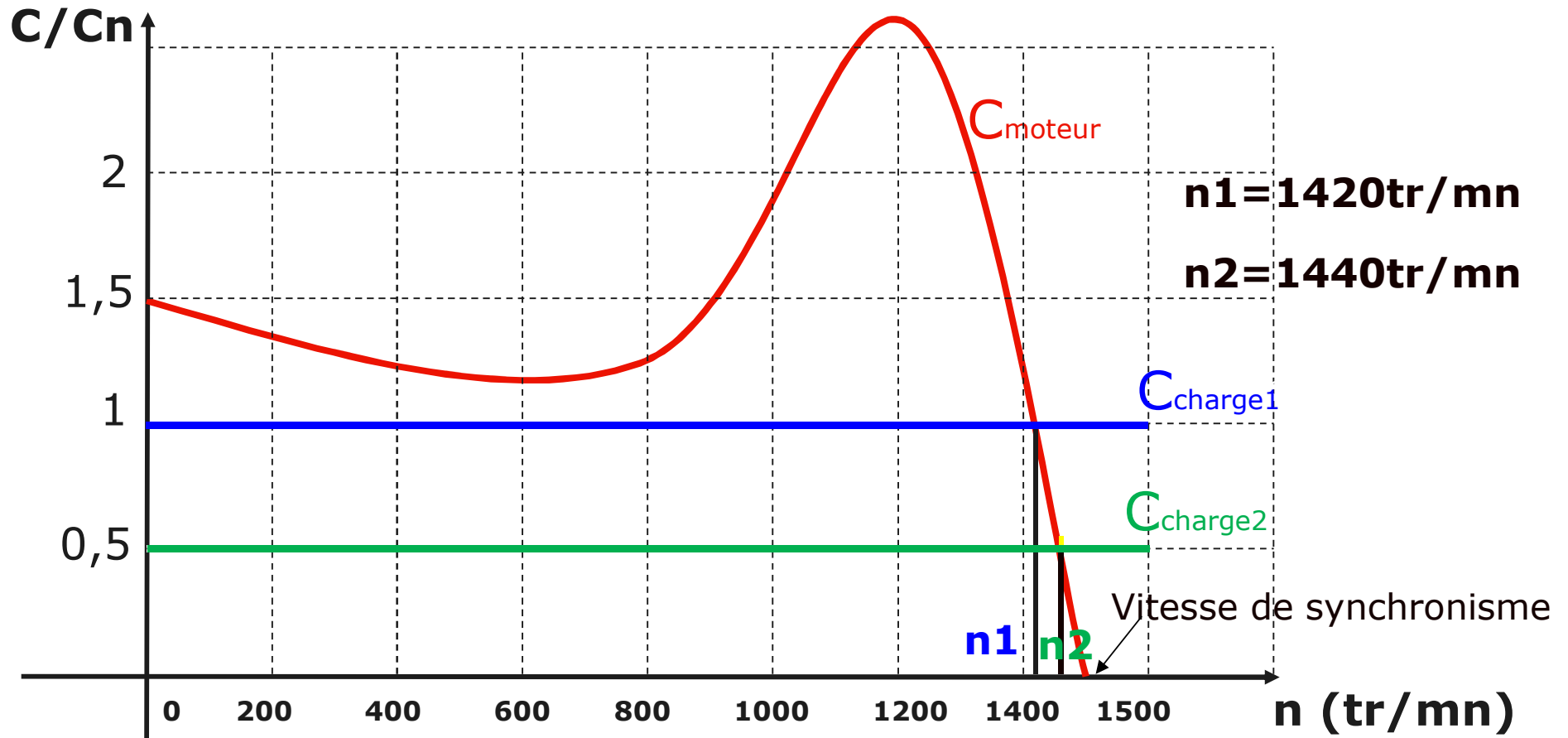
- Réactance X :

$$X = \frac{Q_{cc}}{3I_{cc}^2} = 12,6\Omega$$

Machine asynchrone triphasée

10. Variation de vitesse:

Fonctionnement de base à $V = cst$ et $f = cst$:



Remarque: Dans cet exemple, pour une diminution de couple de 50% la vitesse ne baisse que de $\Delta n/n = 20/1420 = 0.014$ soit **1,4%**

Machine asynchrone triphasée

La vitesse Ω du moteur asynchrone est égale à:

$$\Omega = \Omega_s(1 - g) = \frac{\omega}{p}(1 - g)$$

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par:

- Action sur le nombre de paires de pôles p ;
- Action sur le glissement g :
 - ✓ variation de la tension d'alimentation statorique V_1 ;
 - ✓ Variation de la résistance R_2 des enroulements rotoriques. qui peut être modifiée seulement pour les machines à rotor bobiné;
- Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique $\omega = 2\pi f$.

Machine asynchrone triphasée

10.1. Action sur le nombre de paires de pôles:

Il est possible de réaliser un moteur à deux vitesses distinctes (grande et petite vitesse GV, PV), par combinaison au stator de bobinages présentant des nombres de pôles différent. Selon les bobinages statoriques on distingue:

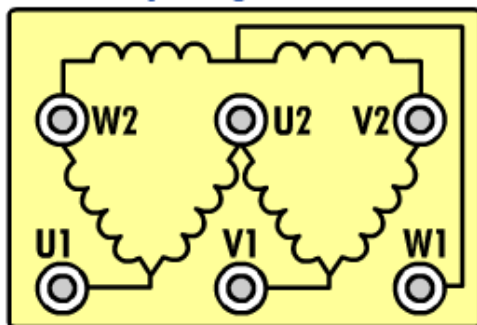
- Moteurs à couplage de pôles (bobinages associés);
- Moteur à enroulements séparés.

□ Moteurs à couplage de pôles (moteur de type Dahlander):

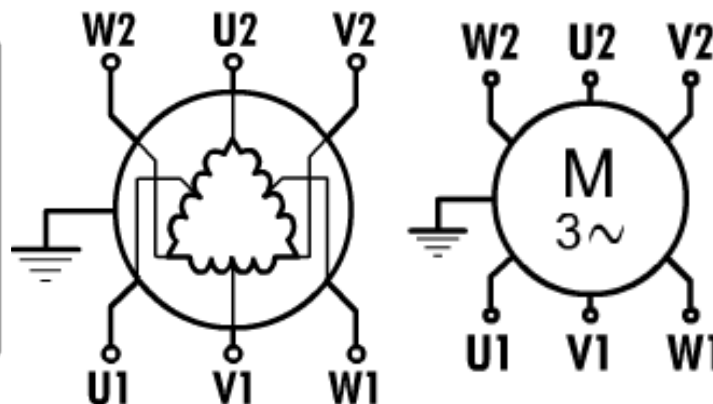
- Ce type de moteur possède 2 bobinages distincts par phase, qui peuvent être couplés en série (4 pôles) ou en parallèle (2 pôles);
- la vitesse de synchronisme varie donc dans le **rapport 2** et la grande vitesse correspond au couplage parallèle.

Boîte à bornes et schéma:

Bornes pour grande vitesse

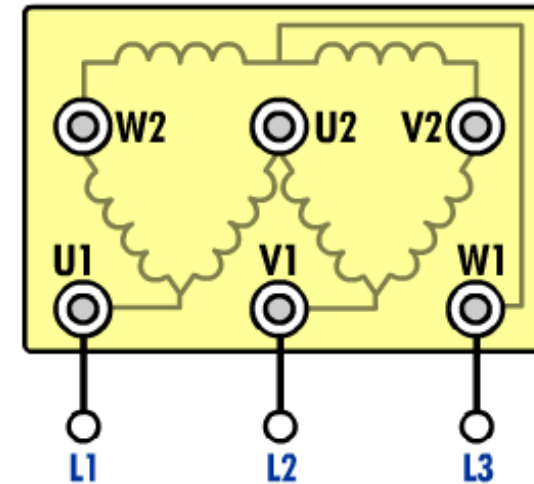
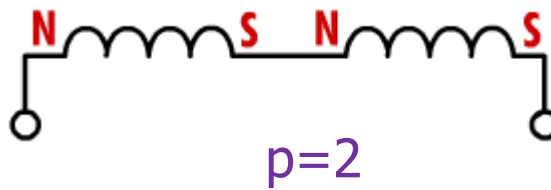
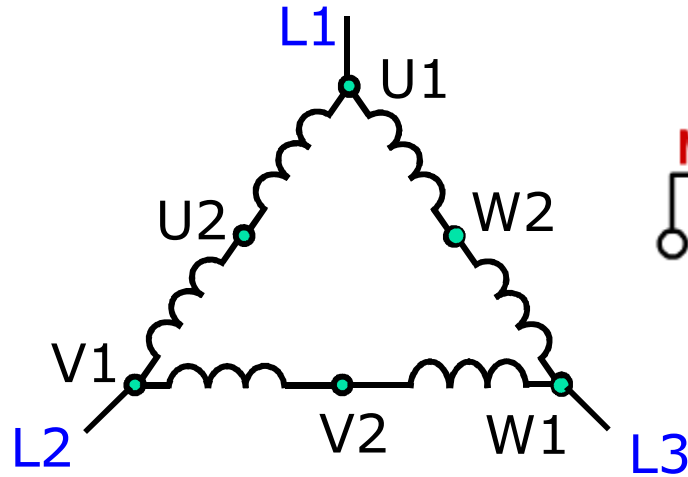


Bornes pour petite vitesse

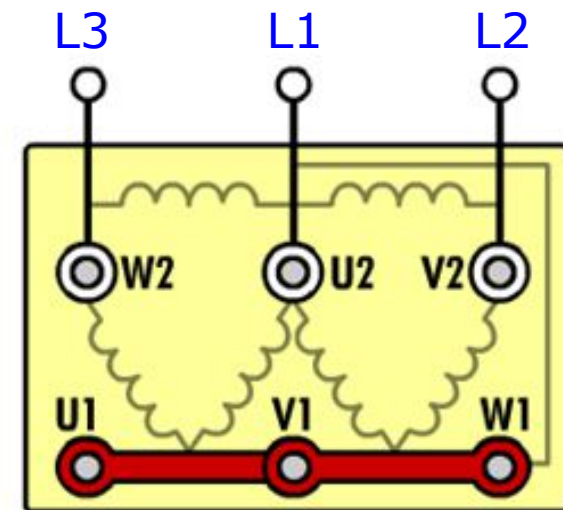
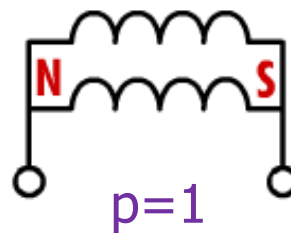
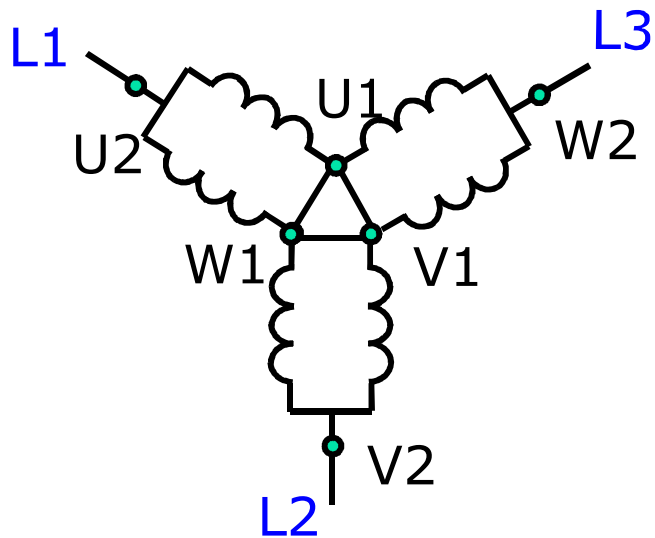


Machine asynchrone triphasée

Couplage triangle-série: petite vitesse

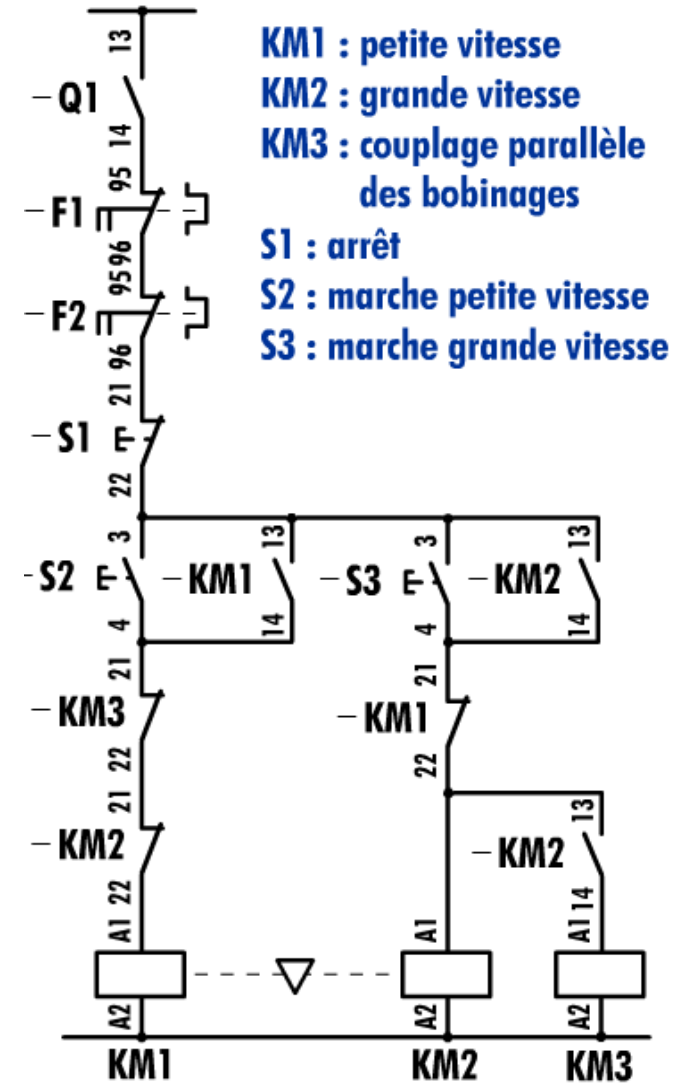
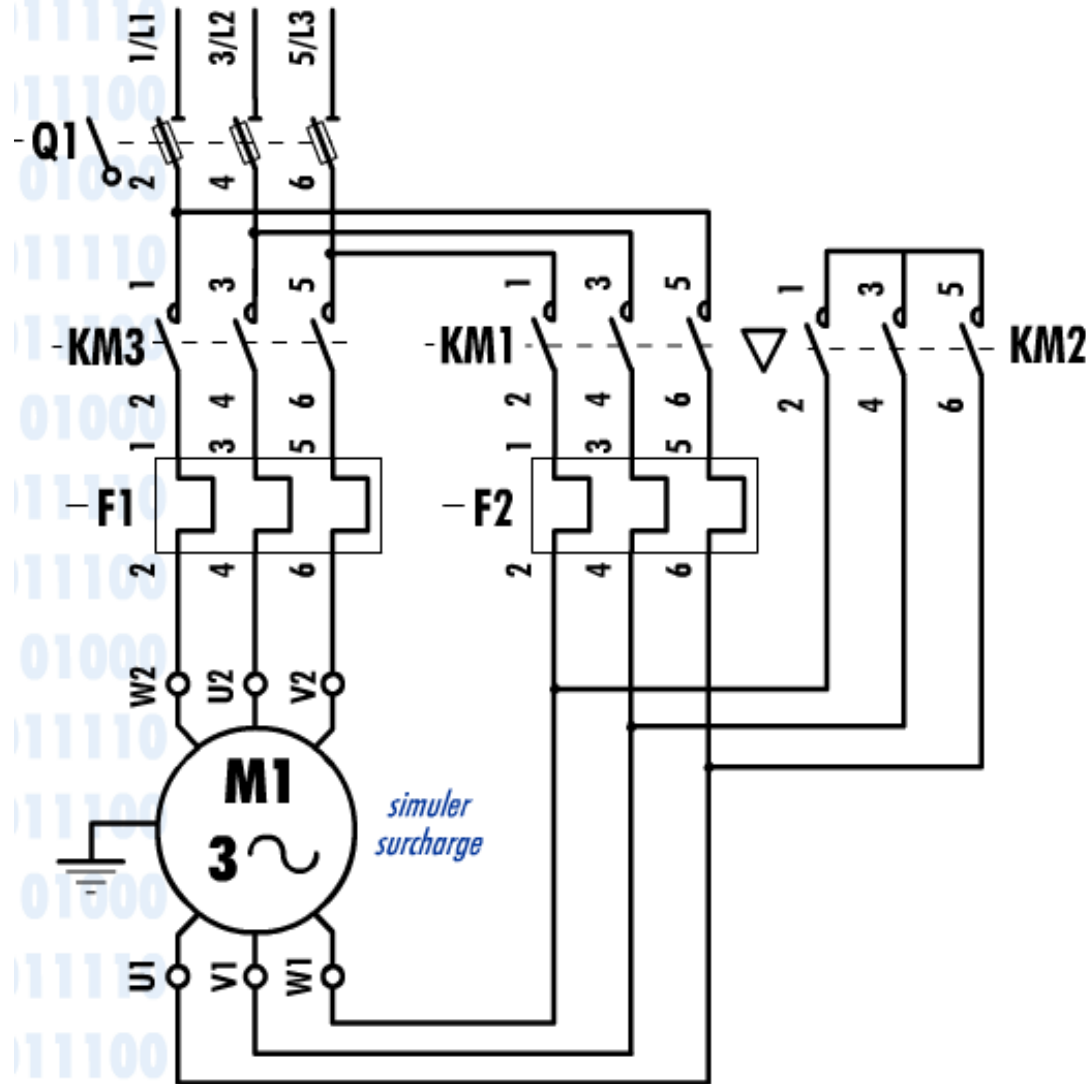


Couplage étoile-parallèle: grande vitesse



Machine asynchrone triphasée

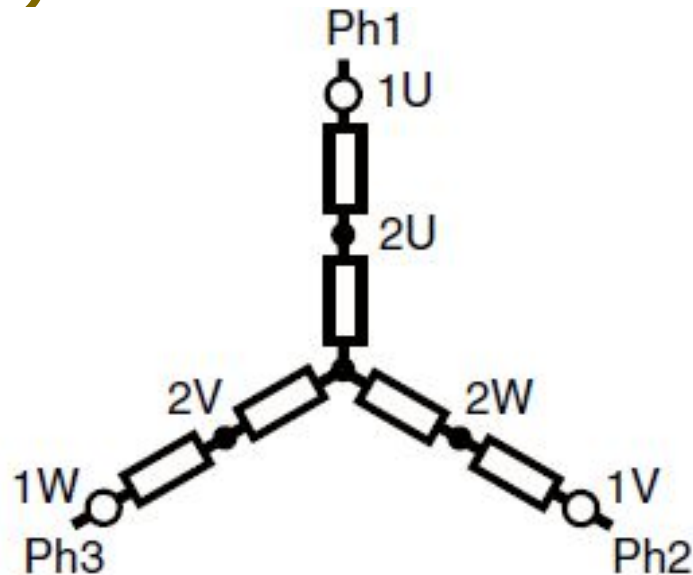
Circuit de puissance et circuit de commande:



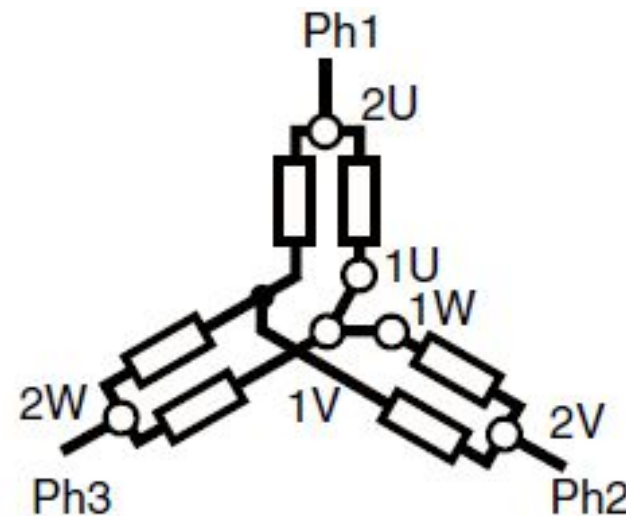
Ce type de couplage convient bien à une charge dont le couple est constant (treuil).

Machine asynchrone triphasée

Couplage étoile-série (petite vitesse) / étoile- parallèle (grande vitesse):



$p=2$; petite vitesse



$p=1$; grande vitesse

Ce type de couplage convient lorsque la machine entraînée travaille à puissance constante.

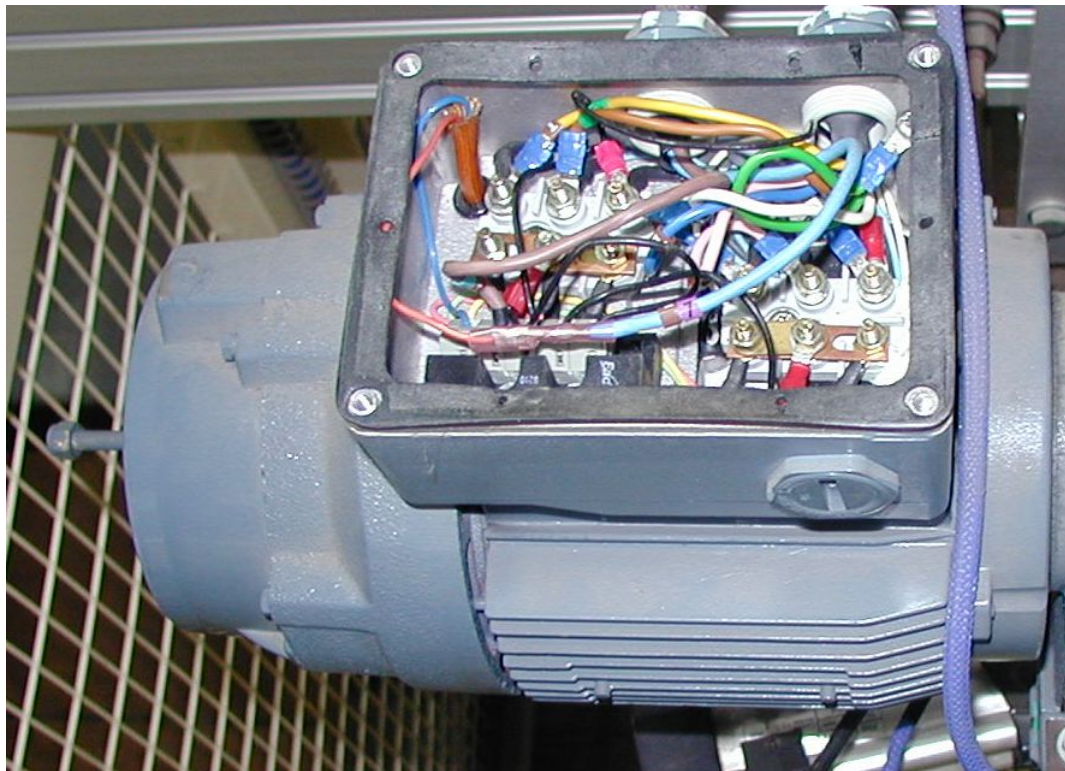
Remarque:

- Les connexions externes de la plaque à borne sont les mêmes pour les deux types de couplage précédents;
- Ces techniques ne permettent pas un réglage continu de la vitesse.

Machine asynchrone triphasée

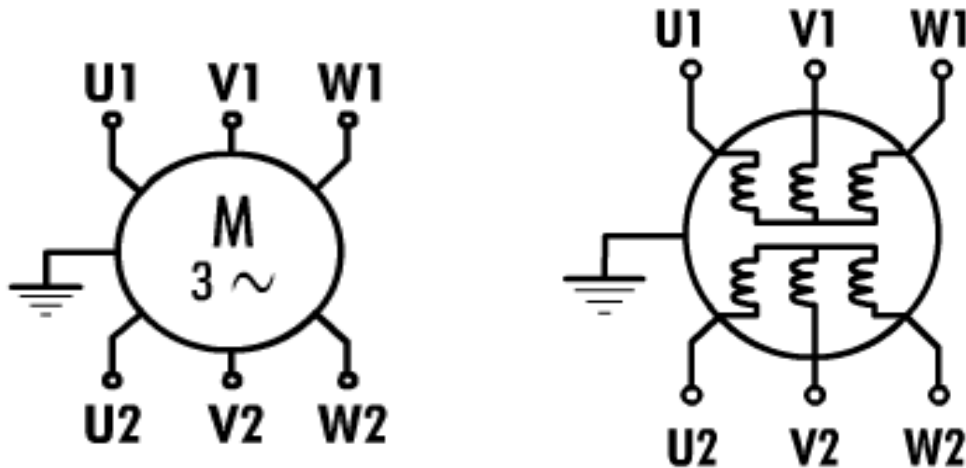
□ Moteurs à enroulement séparés:

- Le stator de ces moteurs est constitué de plusieurs enroulements totalement indépendants. On considère chacun des enroulements comme appartenant à un moteur distinct,
- L'encombrement est plus important, mais le rapport des vitesses peut être différent de 2.

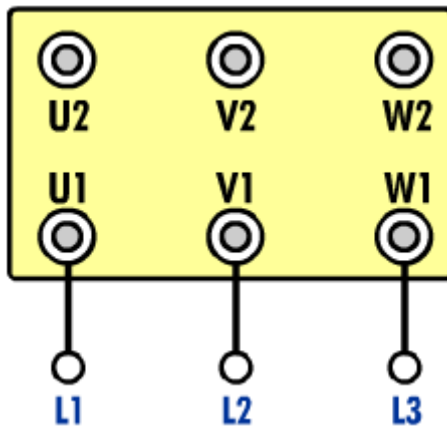


Machine asynchrone triphasée

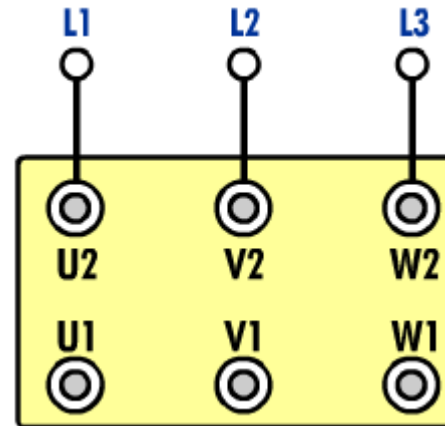
Boite à bornes et schéma:



Branchement pour la vitesse 2



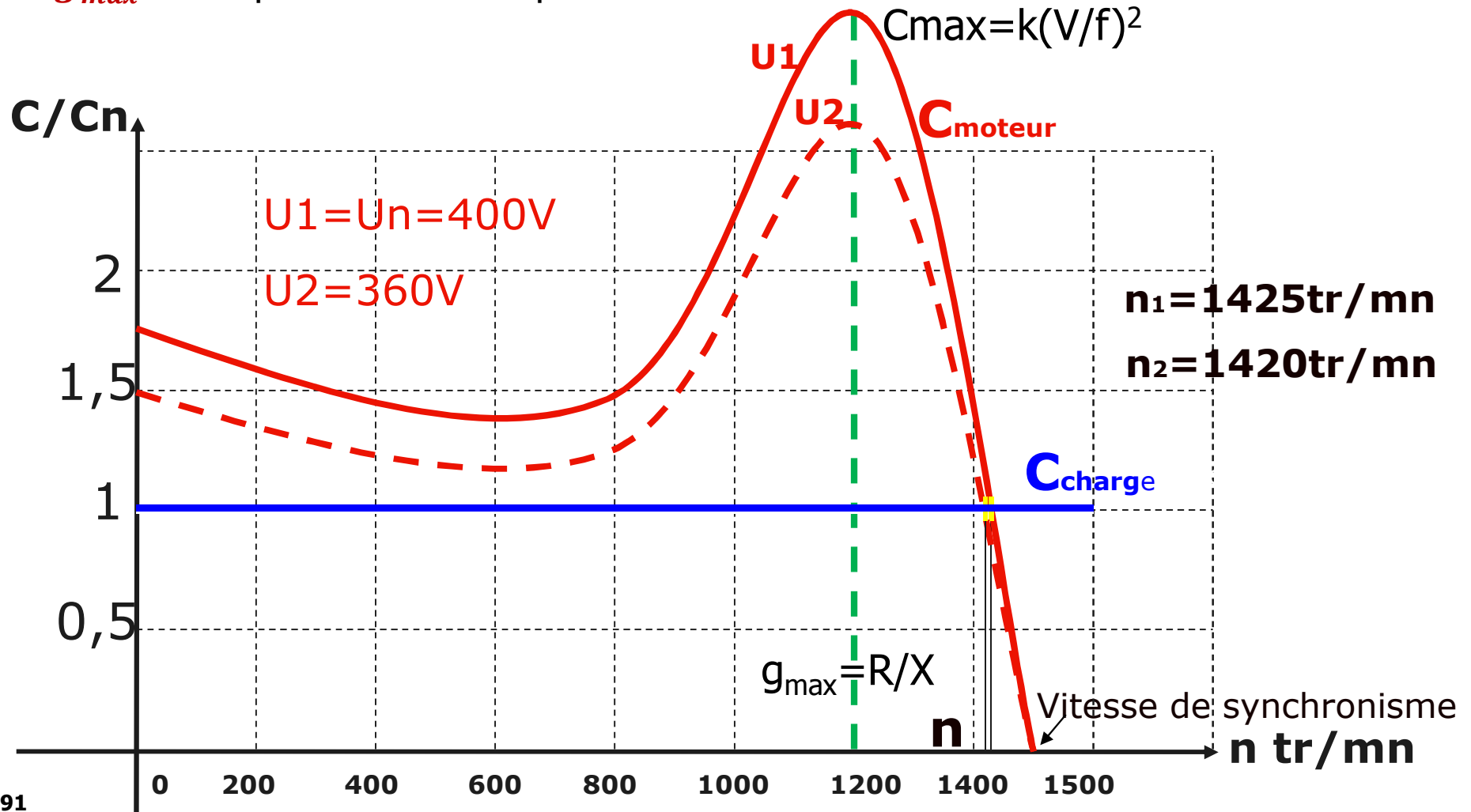
Branchement pour la vitesse 1



Machine asynchrone triphasée

10.2. Action sur la tension d'alimentation à $f=cst$:

- À glissement donné, le couple est proportionnel au carré de la tension:
- Le couple maximal C_{max} est proportionnel au carré de la tension et le glissement g_{max} correspondant est indépendant de la tension.



Machine asynchrone triphasée

- Dans cet exemple, pour une diminution de tension de 10% la vitesse ne baisse que de $\Delta n/n = 5/1425 = 0.0035$ soit 0,35%;

Ce mode de réglage de la vitesse présente les inconvénients:

- La plage de variation de vitesse est très réduite, limitée entre la vitesse permettant l'obtention du couple maximum et la vitesse de synchronisme.
- Lorsque la tension V diminue, le couple maximal disponible est réduit, puisque $C_{max} = k \left(\frac{V}{f}\right)^2$, et augmente le risque d'instabilité;
- Ce procédé de réglage ne convient pas pour les entraînements à couple constant.

Remarque:

- La variation de vitesse par réglage de la tension est réservée aux charges imposant un couple croissant rapidement avec la vitesse (possédant un couple résistant faible au démarrage: ventilateurs, compresseurs et certaines pompes).
- La variation de tension est obtenue par un alternostat ou plus souvent par un gradateur triphasé.

Machine asynchrone triphasée

10.3. Action sur la résistance du rotor à $f=cst$:

Pour les machines à rotor bobiné, on peut augmenter la résistance rotorique en branchant un rhéostat triphasé sur les bagues.

Soit $R' = (R_2 + R_h)/m^2$ la résistance ramenée au stator d'une phase rotor avec le rhéostat.

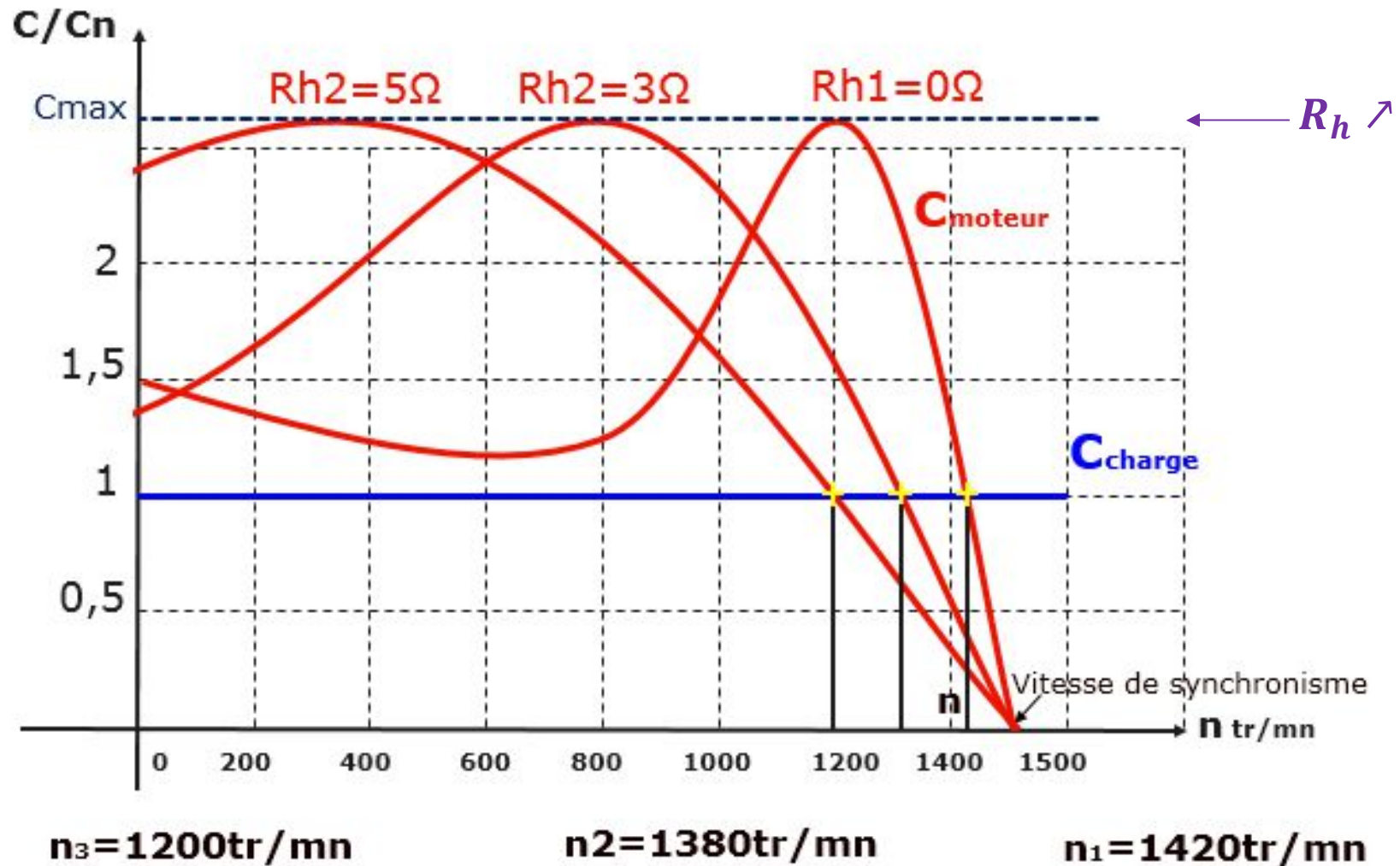
- Le couple maximal $C_{max} = \frac{3pm^2}{8\pi^2 l_2} \cdot \frac{V_1^2}{f^2}$ est indépendant de R' ;
- Le glissement $g_{max} = \frac{R'}{X}$ est proportionnel à R' ;
- La vitesse ne peut être que diminuée par augmentation du glissement (augmentation de R_h);
- Mais, le rendement diminue par augmentation des pertes Joule rotoriques;
- Pour les faibles vitesses, ces pertes seront très élevées et le rhéostat devra être très volumineux;
- La baisse de vitesse obtenue par une résistance peut être de 50 % à pleine charge et 25 % seulement à demi-charge, alors que la vitesse à vide reste pratiquement inchangée.

En raison de la diminution du rendement avec la vitesse, cette méthode ne peut être utilisée que pour de faibles variations à partir de la vitesse nominale.

Machine asynchrone triphasée

À tension et fréquence constantes, le couple dans la zone utile ($g \ll 1$) est

$$C = \frac{3pV_1^2}{2\pi f} \cdot \frac{g}{R'} = \frac{k}{R'} (\Omega_s - \Omega), \text{ la pente diminue avec } R_h.$$



Machine asynchrone triphasée

10.4. Action sur la fréquence à $V=cst$:

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation. L'action sur la fréquence, modifie la vitesse de synchronisme ainsi que le point de fonctionnement.

- Expression du couple:

$$C = \frac{3pV_1^2}{2\pi f} \frac{\frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + \left(2\pi \frac{l_2}{m^2} f\right)^2}$$

- À tension d'alimentation donnée, la modification de la fréquence agit sur:

- ✓ La vitesse de synchronisme: $\Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi}{p} f$

- ✓ Le couple maximal $C_{max} = \frac{3pm^2}{8\pi^2 l_2} \cdot \frac{V_1^2}{f^2} = \frac{a}{f^2}$ est inversement proportionnel à f^2 ;

- ✓ Le glissement $g_{max} = \frac{R}{X} = \frac{m^2 R}{2\pi l_2} \cdot \frac{1}{f} = \frac{b}{f}$ est inversement proportionnel à f ;

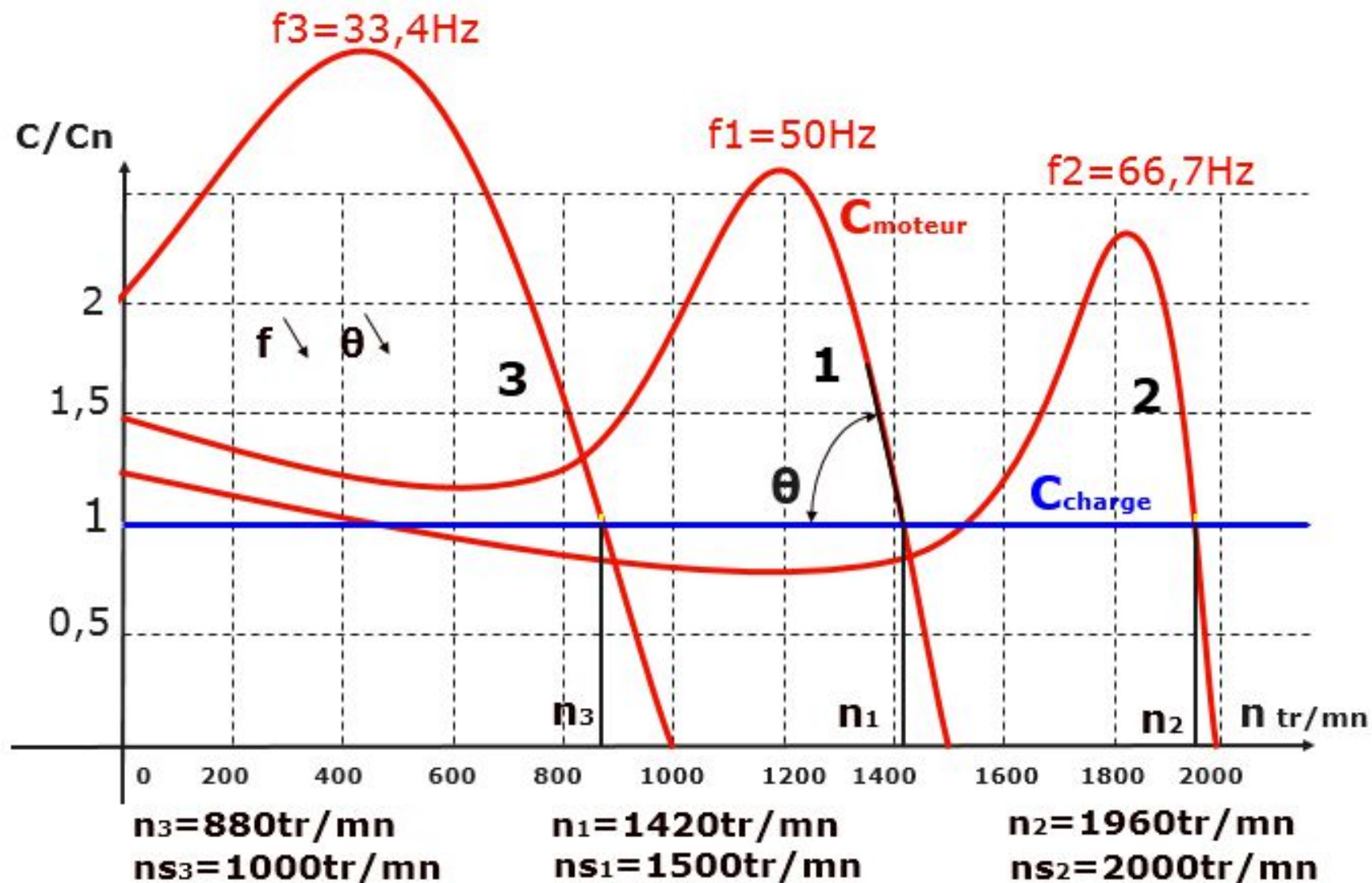
- ✓ Dans la zone de fonctionnement utile de la caractéristique mécanique;

le couple est proportionnel au glissement: $C = \frac{3pV_1^2}{2\pi f} \cdot \frac{g}{R}$ et inversement

proportionnel à f .

Machine asynchrone triphasée

Caractéristiques mécaniques: Fonctionnement sous fréquence variable:



Machine asynchrone triphasée

Nous constatons:

- Une large gamme de vitesses quelle que soit la forme du couple résistant;
- Un faible glissement donc un bon rendement à toutes les fréquences;
- Un risque de décrochage aux fréquences supérieures à la fréquence nominale par suite de diminution du couple maximal;

L'inconvénient de ce mode de réglage est la variation du flux avec la fréquence;

- D'après la relation de Boucherot: $\phi_{max} = \frac{V_1}{4,44N_1f}$
- Lorsque la fréquence f diminue à tension constante $V_1 = cst$, le flux ϕ_{max} augmente; la machine étant calculée pour être légèrement saturée à fréquence nominale,
- En basses fréquences, la machine sera très saturée et le courant magnétisant I_0 qui crée le flux est élevé. Si on néglige les pertes on a:

$$I_0 = \frac{V_1}{L_m \omega} = \frac{V_1}{2\pi L_m f} ; \quad \phi = L_m I_0$$

Le réglage par variation de la fréquence peut seulement être utilisé pour ajuster la vitesse dans un faible plage (10 à 20%) autour de la vitesse nominale. La variation de fréquence est obtenue en alimentant le moteur par un convertisseur de fréquence de type « onduleur ».

Machine asynchrone triphasée

10.5. Action simultanée sur la tension et la fréquence:

La vitesse étant proportionnelle à la fréquence et dépendant peu de la tension, pour éviter l'inconvénient du mode précédent, il suffit de faire varier simultanément V_1 et f en maintenant $\frac{V_1}{f} = cst$ pour garder un flux constant.

$\phi = cst$. Ce mode de réglage permet une vraie variation de la vitesse.

Dans ce cas:

- Le couple maximal est constant $C_{max} = k \left(\frac{V}{f}\right)^2 = cst$
- Le glissement $g_{max} = \frac{b}{f}$ varie inversement proportionnellement à la fréquence.

Dans un fonctionnement à couple constant et vitesse variable: $C_{max} = cst$;

$$g = g_{max} = \frac{b}{f}$$

- La puissance électromagnétique transmise: $P_{TR} = C\Omega_s = C\frac{\omega}{p} = \alpha f$;
- Les pertes par effet Joule au rotor sont constantes $P_{JR} = gP_{TR} = cst$;
- Le courant rotorique est donc constant ($P_{JR} = 3R_2I_2^2$) ainsi que le courant de travail ($I'_1 = mI_2$);

Machine asynchrone triphasée

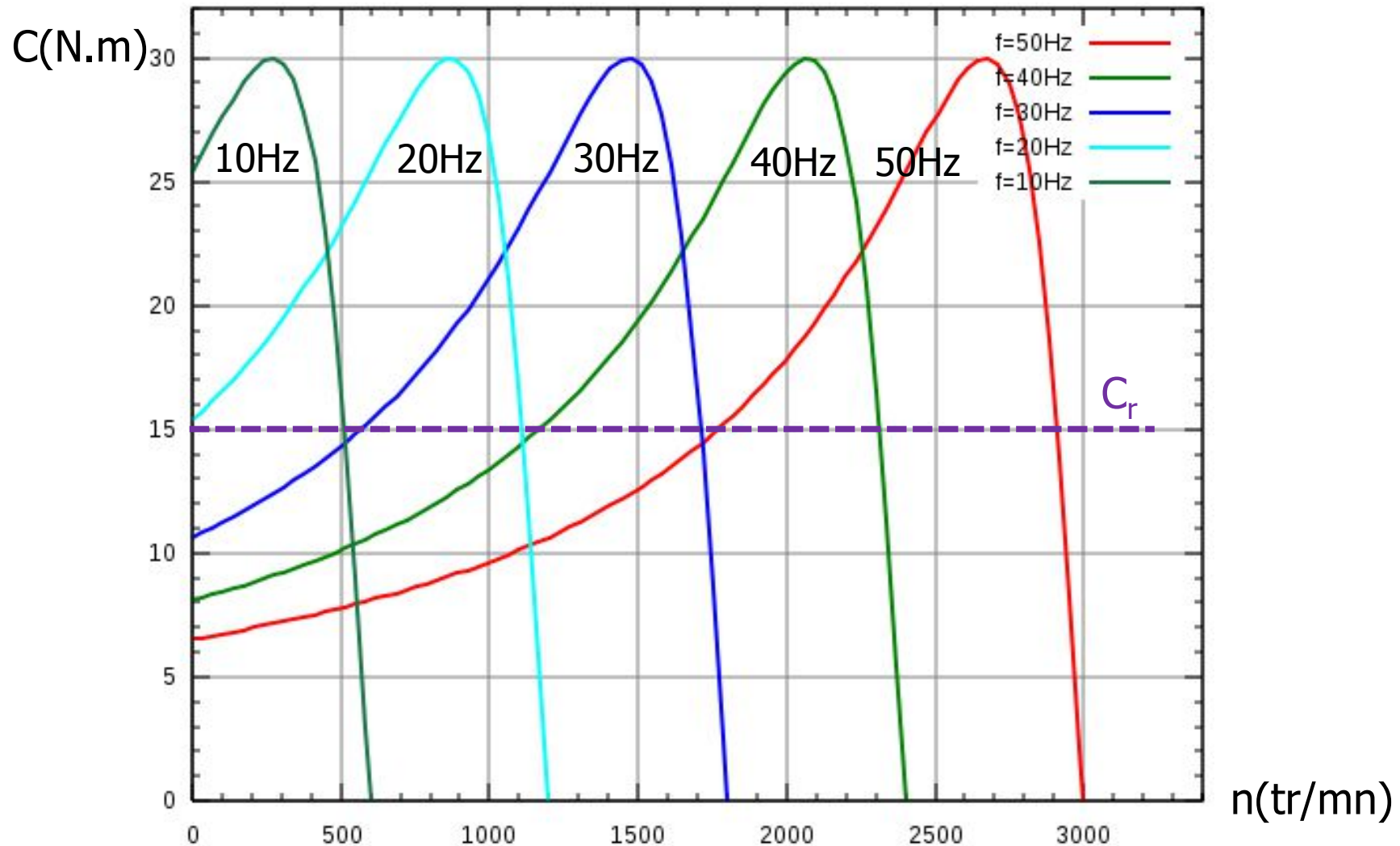
Le flux étant constant, le courant magnétisant l'est aussi, donc le courant statorique est constant ($I_1 = I_{10} + I'_1$);

On retrouve un fonctionnement semblable à celui de la machine à courant continu:

- Le flux étant constant, le courant fourni par le réseau ne dépend que du couple;
- La vitesse étant peu différente de celle de synchronisme, nous avons:
$$\Omega \approx \Omega_s = \frac{2\pi f}{p}; \text{ et } \frac{V}{f} = 2\pi V / p\Omega_s = cst$$
- Donc la vitesse $\Omega \approx \Omega_s = \beta V$ est proportionnelle à la tension du réseau.

Machine asynchrone triphasée

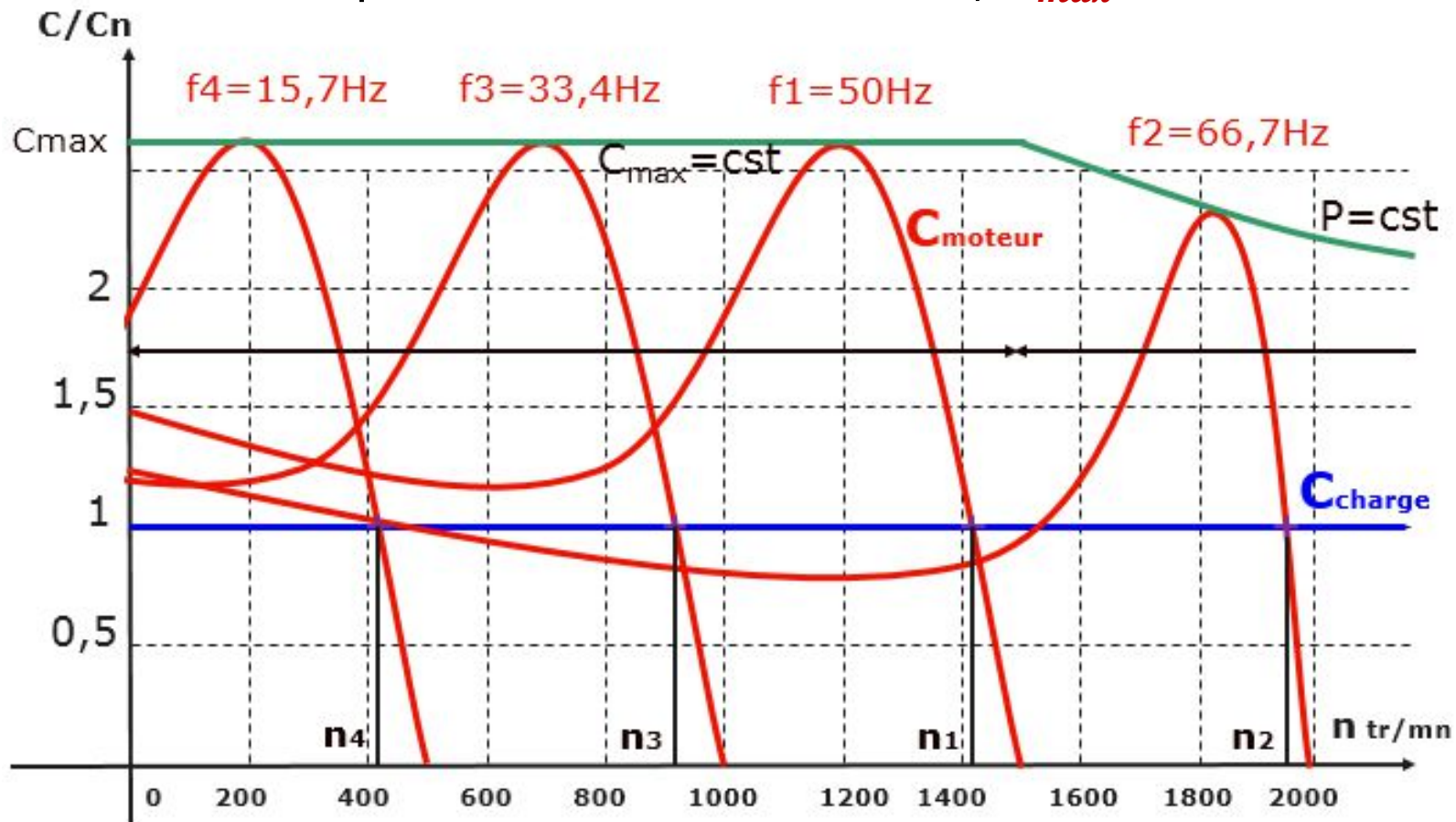
Lorsque le rapport V/f est constant on peut écrire pour la partie linéaire de la caractéristique: $C = cst(n_s - n)$, les caractéristiques pour diverses fréquences se déduisent par translation (droites parallèles dans la partie utile) .



Machine asynchrone triphasée

Nous constatons un réglage de la vitesse dans une large gamme, quelle que soit la forme du couple résistant.

- Lorsque la fréquence diminue $f < f_n$; $\phi = \phi_n = \text{cst}$; $0 \leq V \leq V_n$; $\Omega < \Omega_n$: fonctionnement à couple constant $C_{max} = \text{cst}$;
- Lorsque la fréquence augmente $f > f_n$; $\phi \searrow$; $V = V_n = \text{cst}$; $\Omega > \Omega_n$: fonctionnement à puissance constante $P = \text{cst}$; $C_{max} \searrow$

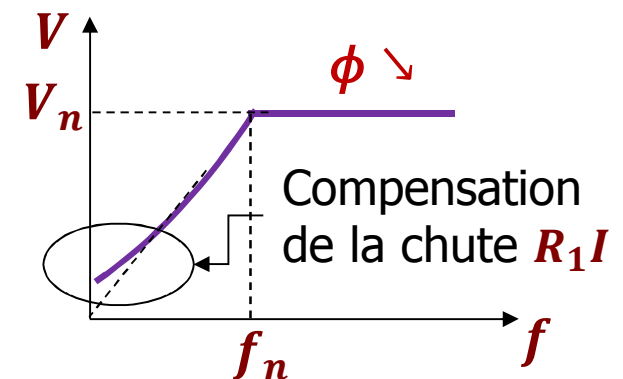
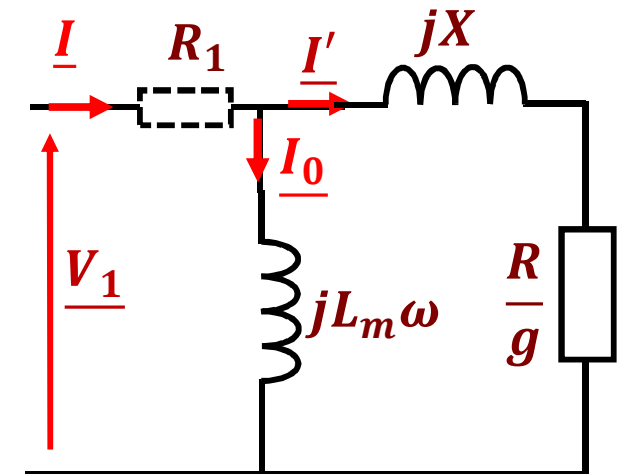


Machine asynchrone triphasée

Le réglage de vitesse dit à " $V/f = cst$ " (appelé commande scalaire) est fréquemment utilisé en raison de sa simplicité: un convertisseur de fréquence « onduleur » fournit les tensions triphasées à fréquence et amplitude variables.

Remarque:

- Ce mode ne convient pas pour les vitesses faibles;
- Les caractéristiques précédentes sont obtenus avec le calcul simplifié qui néglige la résistance statorique R_1 ;
- À des fréquences et tensions faibles; la chute de tension $R_1 I$ ne peut être négligée pour maintenir $\frac{V}{f} = cst$; et l'hypothèse de calcul n'est plus vérifiée;
- Aux fréquences basses, le couple maximal est fortement réduit;
- Pour améliorer le fonctionnement à basse vitesse voire à l'arrêt, on peut utiliser un ajustage (par exemple augmenter la tension d'une valeur fixe V_0 à basse fréquence) de la loi $\frac{V}{f}$



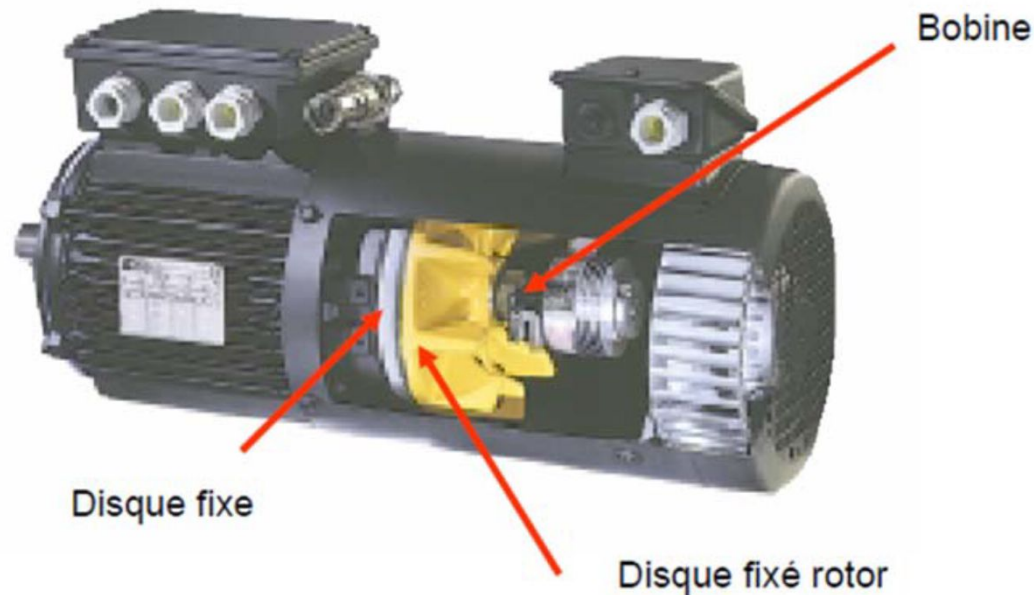
11. Procédés de freinage:

- Dans un grand nombre d'applications, l'arrêt du moteur est obtenu simplement par décélération naturelle (un simple appui sur le bouton d'arrêt). Le temps de décélération dépend alors uniquement de l'inertie de la machine entraînée.
- Le freinage électrique apporte une solution efficace et simple par rapport aux freinages mécaniques; pour arrêter rapidement le moteur.
- Le freinage électrique offre l'avantage d'être régulier et de ne mettre en œuvre aucune pièce mécanique d'usure.
- Dans certains cas, l'énergie mécanique récupérée peut être réinjectée sur le réseau électrique.

Machine asynchrone triphasée

11.1. Freinage mécanique:

- Ce sont des moteurs comportant un dispositif de freinage mécanique (mâchoire, disque,...): on appelle l'ensemble moteur frein commandé par un électroaimant;
- Deux possibilités: Frein à manque de courant et Frein à appel de courant.



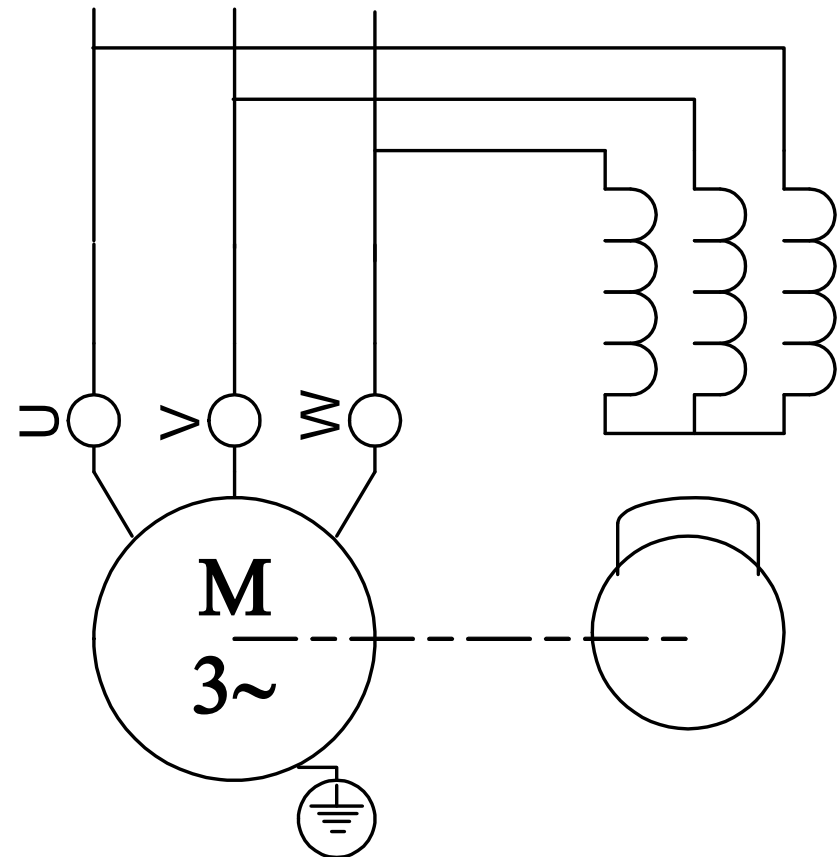
Fonctionnement:

- Une bobine commande le déplacement d'un disque bloqué en rotation.
- Ce disque vient en contact avec un disque fixé sur le rotor du moteur.
- Le frottement des deux disques provoque le ralentissement du moteur.

Machine asynchrone triphasée

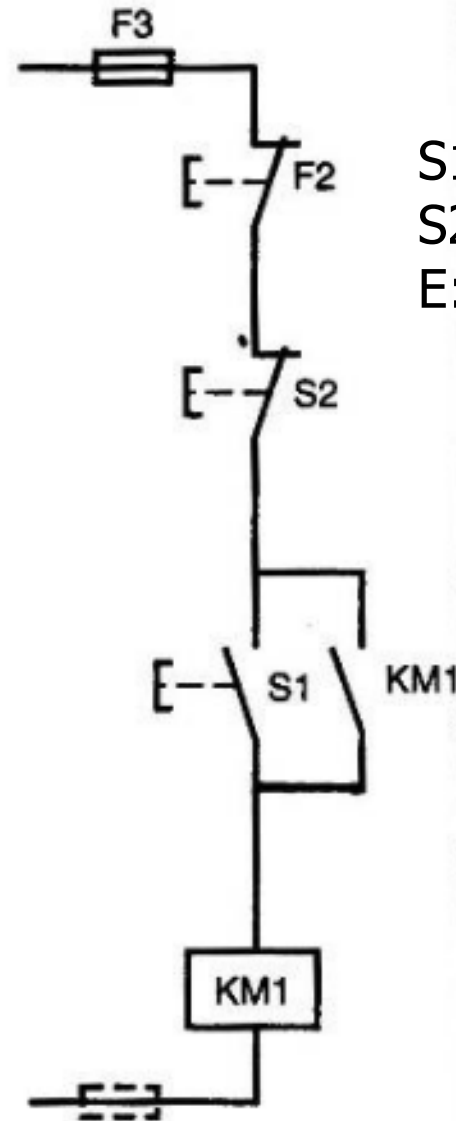
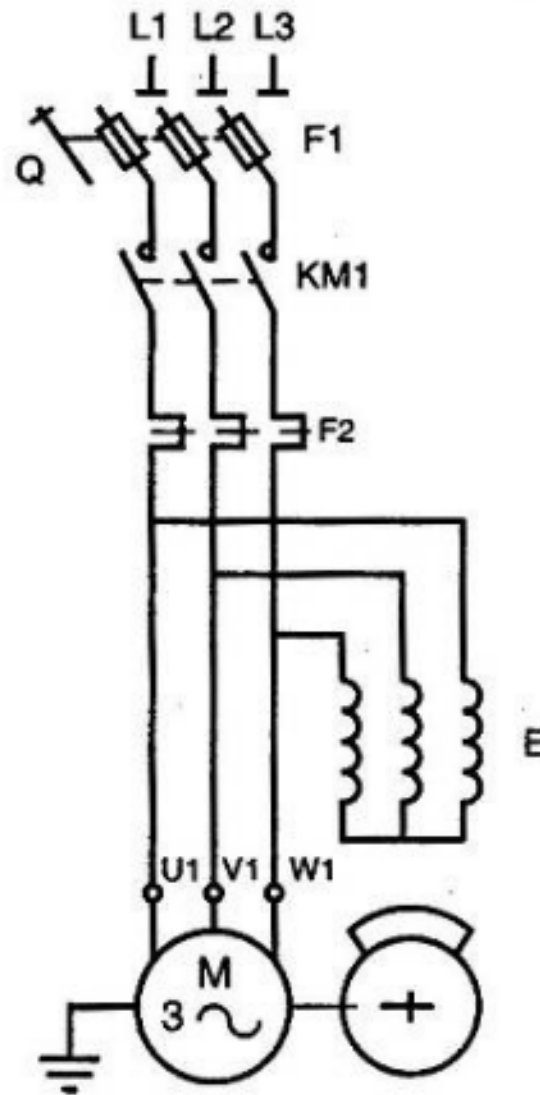
□ Freinage à manque de courant:

- L'électroaimant est alimenté en triphasé, branché en parallèle sur les enroulements statoriques.
- Le frein est actionné mécaniquement (système de ressort au repos), il est souvent utilisé pour des raisons de sécurité.
- Lorsque le moteur et les enroulements du frein ne sont pas alimentés (arrêt normal ou arrêt d'urgence) le freinage est réalisé;
- On obtient avec ce dispositif un freinage brutale, avec un maintien en position blocage.



Machine asynchrone triphasée

Schémas de puissance et de commande:

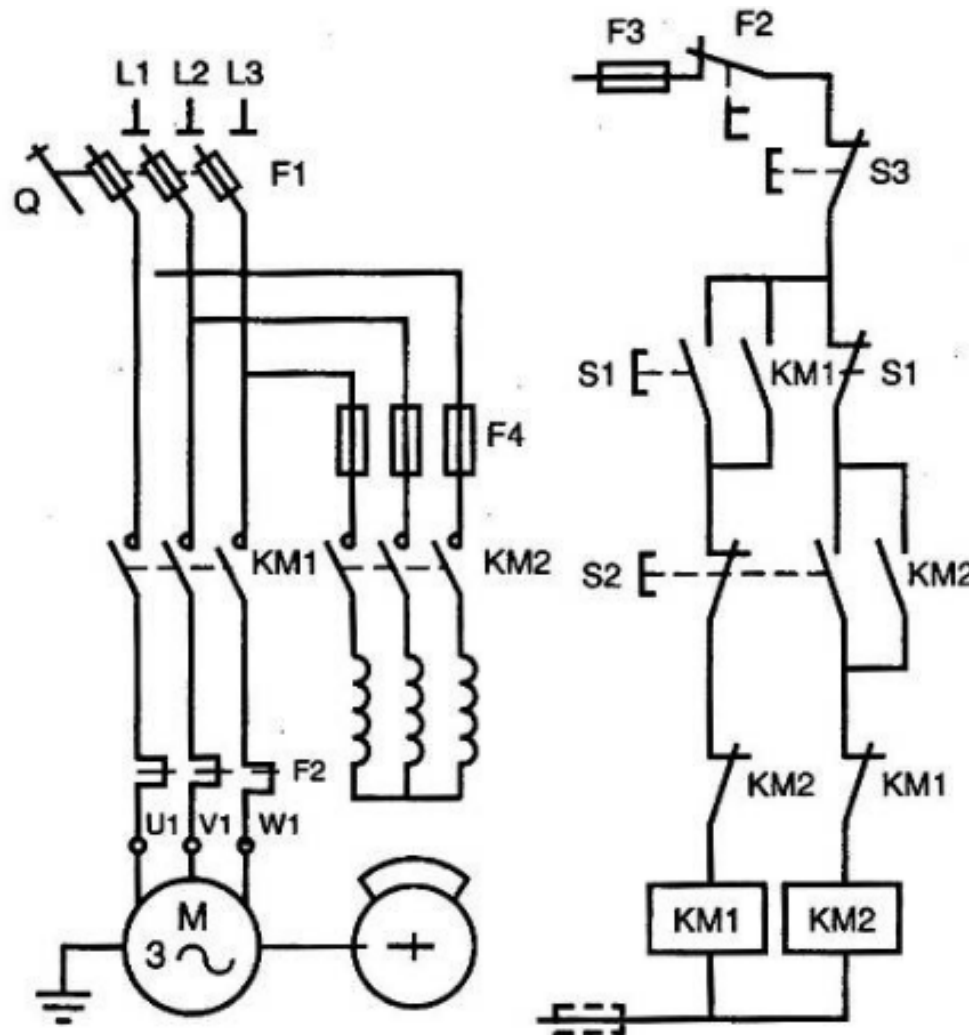


S1: Bp Marche
S2: Bp arrêt
E: électro-frein

Machine asynchrone triphasée

□ Frein à appel de courant:

- C'est l'alimentation électrique du frein qui provoque le freinage du moteur. Il nécessite une alimentation électrique indépendante de celle du moteur.



S1: Bp Marche
S2: Bp arrêt avec frein
S3: arrêt sans frein

Machine asynchrone triphasée

11.2. Freinage électrique:

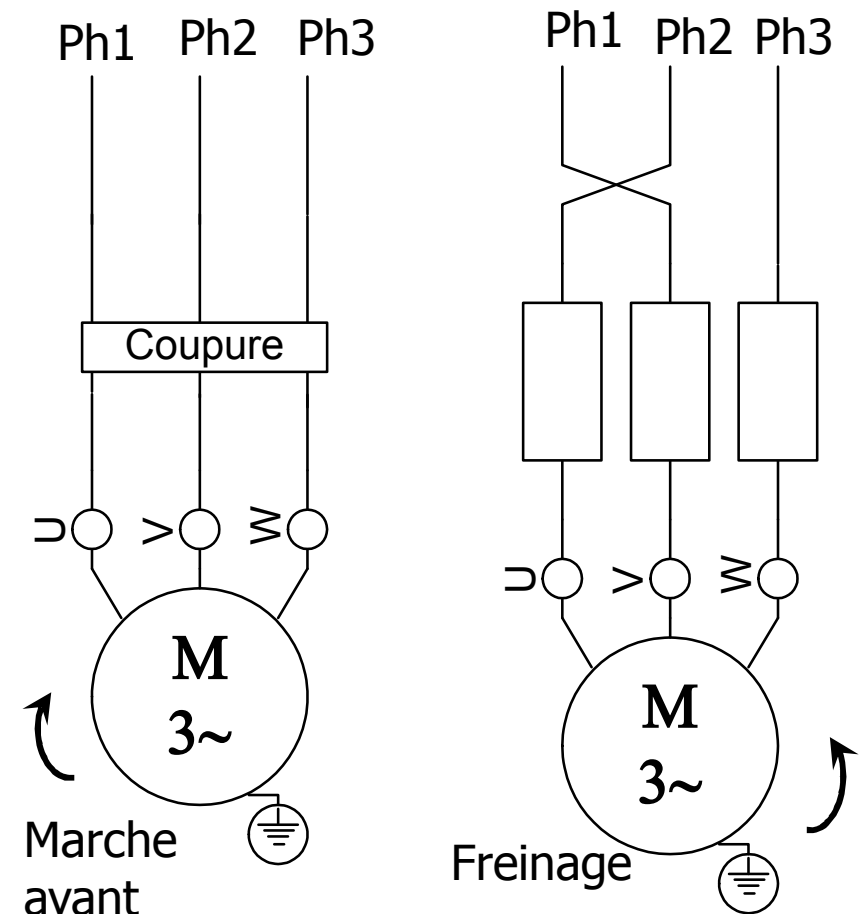
❑ **Freinage par contre courant:** Le freinage par contre courant consiste à inverser deux phases d'alimentation (inverser le sens du champ tournant qui tend à entraîner le rotor en sens inverse) pour arrêter rapidement un moteur. Le moteur freine, s'arrête et repart en sens inverse si on ne coupe pas l'alimentation.

Inconvénients:

- Les pointes de courant sont très importantes ($\sim 2I_d$) et il est conseillé d'insérer des résistances lors du freinage (énergie importante à dissiper dans le rotor et dans le réseau).

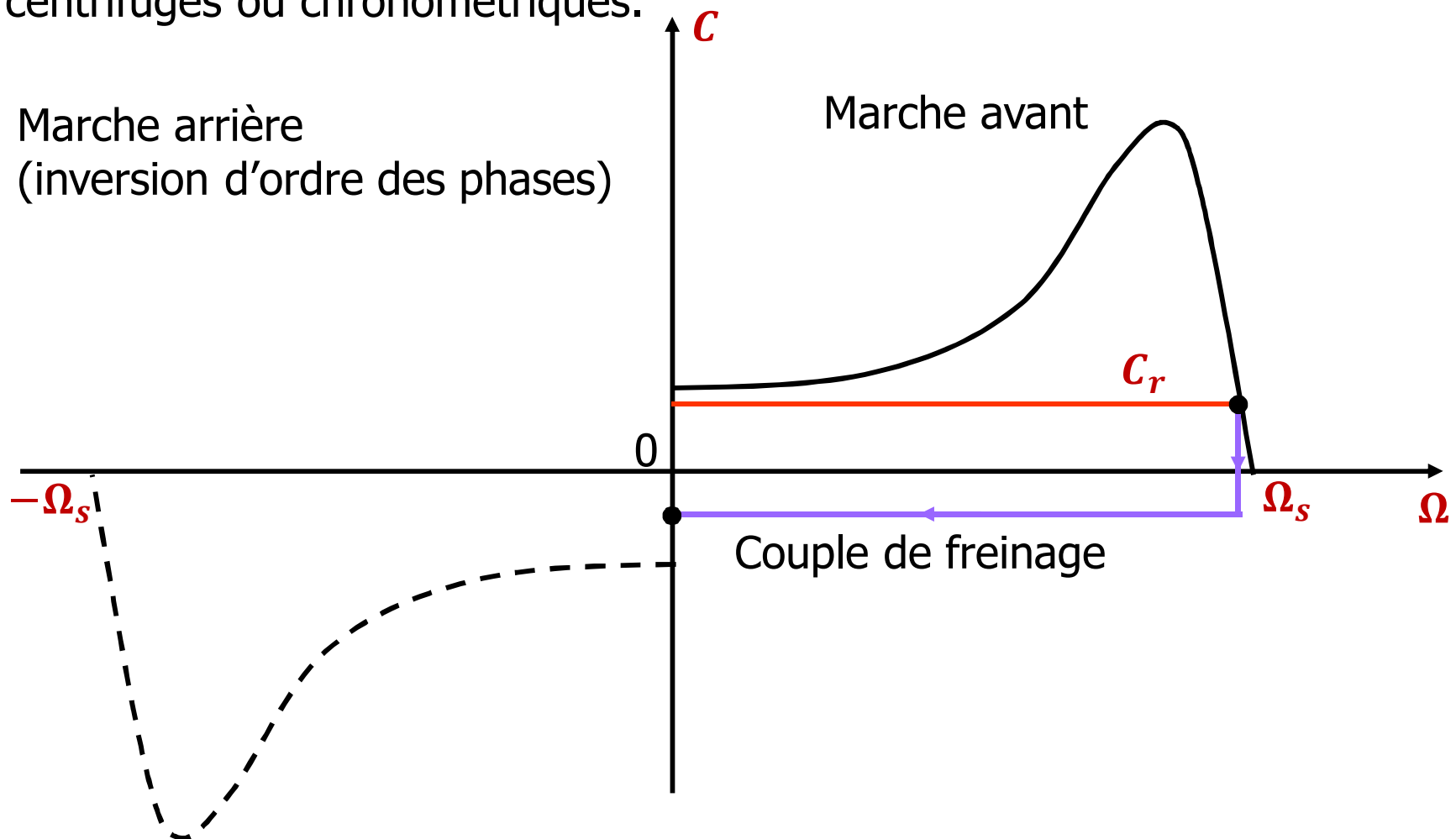
Pour réduire les pointes de courant et le couple au freinage, on peut :

- Insérer des résistances statoriques pour les moteurs à cage;
- Utiliser des résistances rotoriques de démarrage pour les moteurs à bagues.



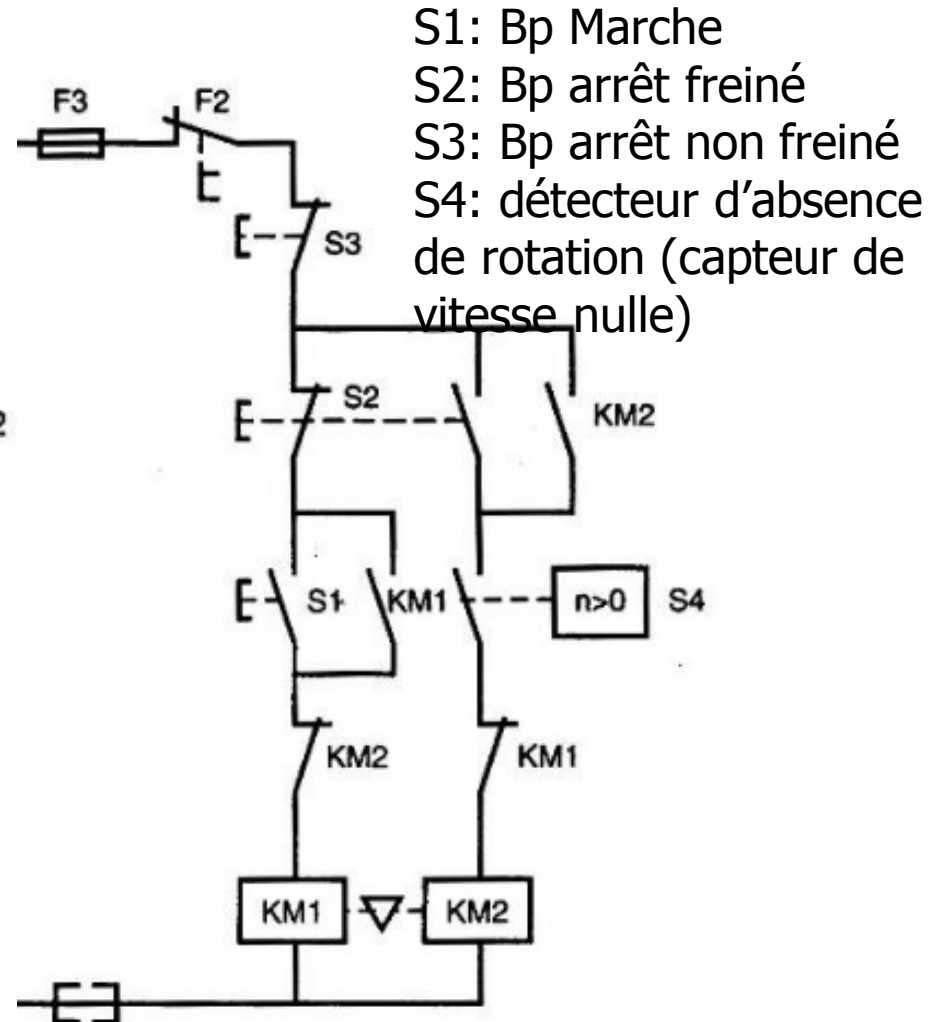
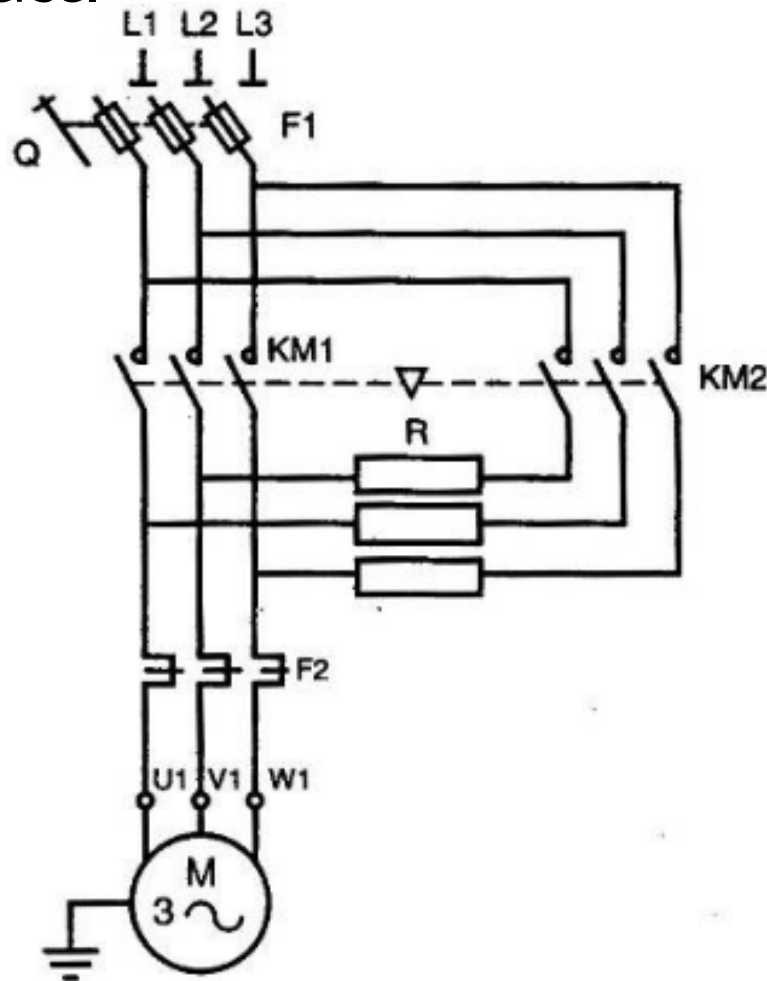
Machine asynchrone triphasée

- Le freinage est très efficace. La tension inverse d'alimentation doit être coupée lorsque le moteur est à l'arrêt;
- La détection de la vitesse nulle est obtenue par des dispositifs à friction, centrifuges ou chronométriques.



Machine asynchrone triphasée

- Lors du freinage, il y a ouverture de KM1 puis fermeture de KM2: le moteur est alimenté par un champ statorique inverse.
- KM2 doit s'ouvrir dès l'arrêt du moteur, pour éviter un redémarrage en sens inverse.



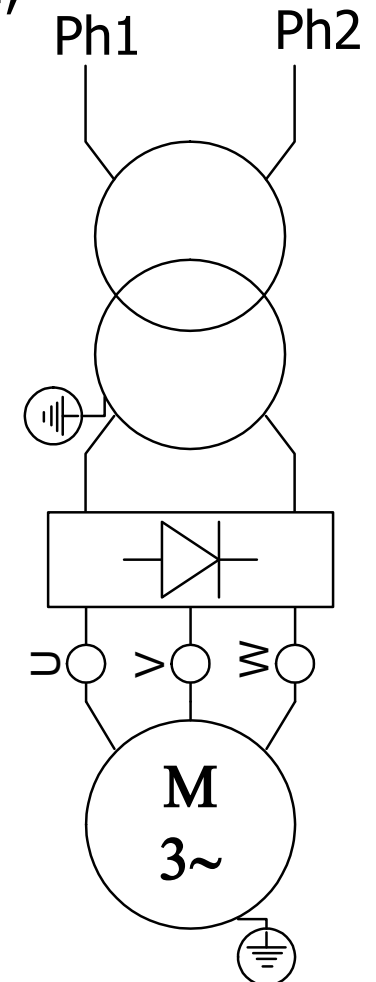
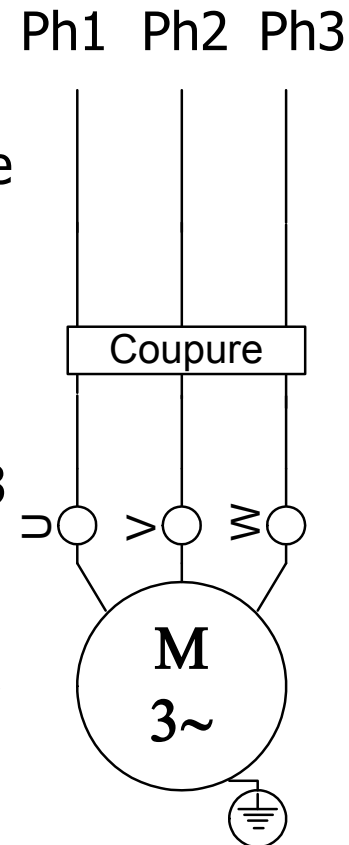
S1: Bp Marche
S2: Bp arrêt freiné
S3: Bp arrêt non freiné
S4: détecteur d'absence de rotation (capteur de vitesse nulle)

Machine asynchrone triphasée

□ Freinage par injection de courant continu:

Il consiste à séparer les bobinages statoriques du réseau d'alimentation, puis alimenter deux d'entre eux par une source continue Très Basse Tension (20 à 24 V) par un redresseur afin de créer un champ magnétique fixe;

- Le rotor du moteur tend à suivre le champ fixe et tend à s'immobiliser;
- Le champ magnétique est d'axe fixe, le rotor tourne; La variation de flux engendre des courants rotoriques induits; d'où naissance d'un couple résistant de freinage;
- Avantages: On règle le couple de freinage par le courant statorique injecté (entre 1,3 et 1,6 I_n), aucun risque de démarrage en sens inverse, faible énergie dissipée au rotor, aucune pièce mécanique en contact;
- Plus la valeur du courant est importante, plus le moteur est freiné rapidement.

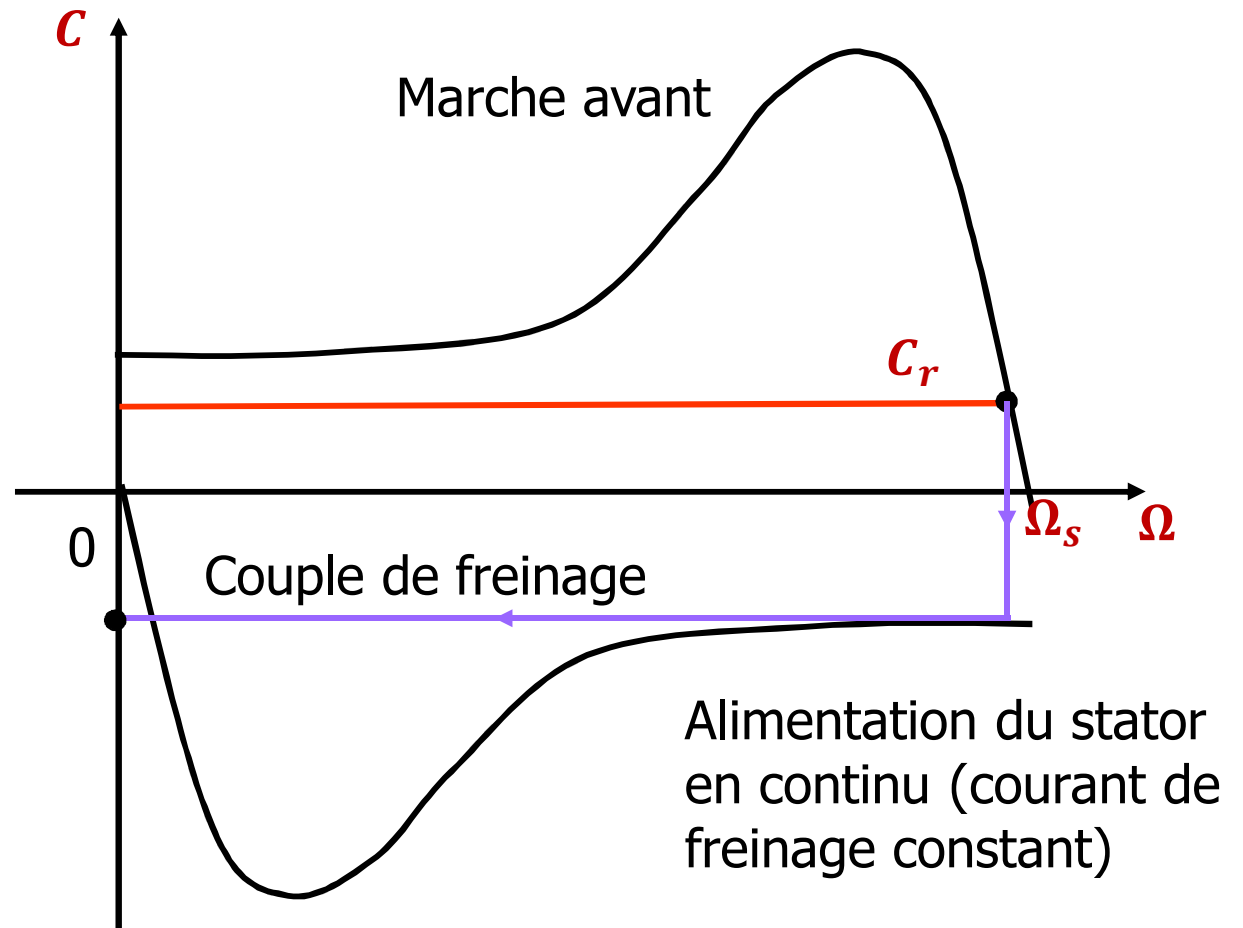


Machine asynchrone triphasée

- L'énergie dissipée dans le rotor est plus faible que dans le cas du freinage par contre courant;
- Ce mode de freinage peut être utilisé indifféremment sur les moteurs à rotor à cage comme sur les moteurs à bagues;
- Ce mode de freinage est souvent intégré dans les variateurs de vitesses électroniques.

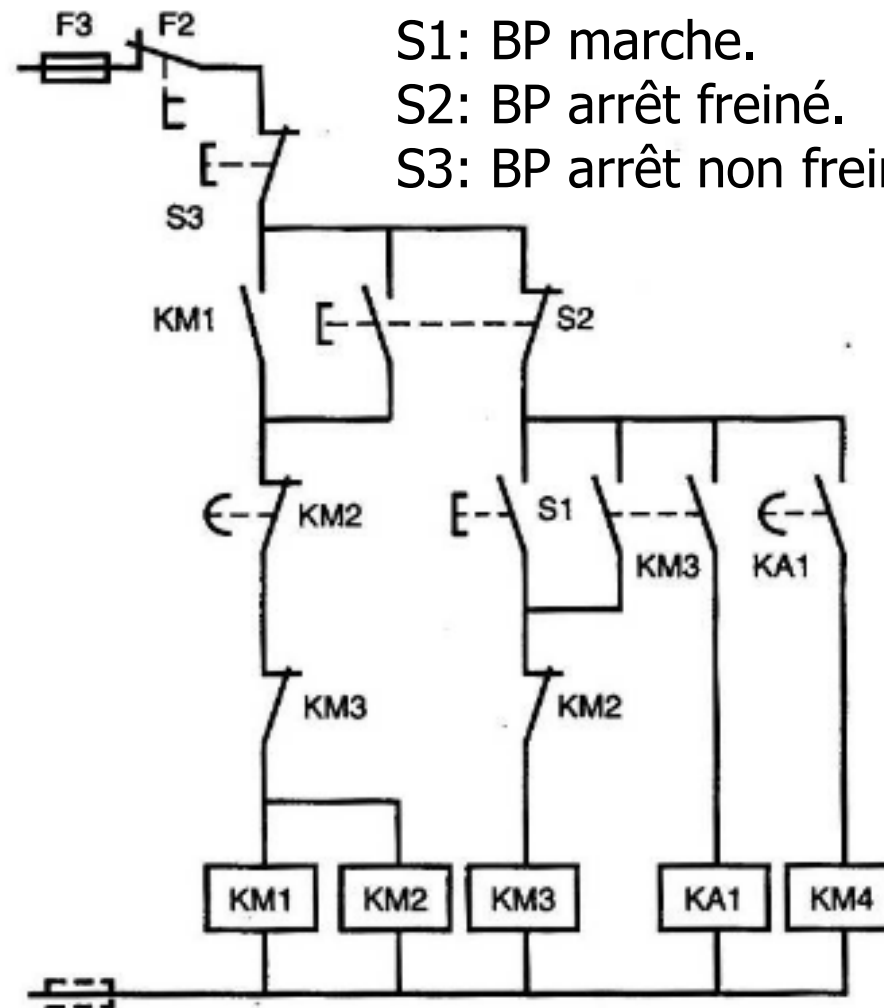
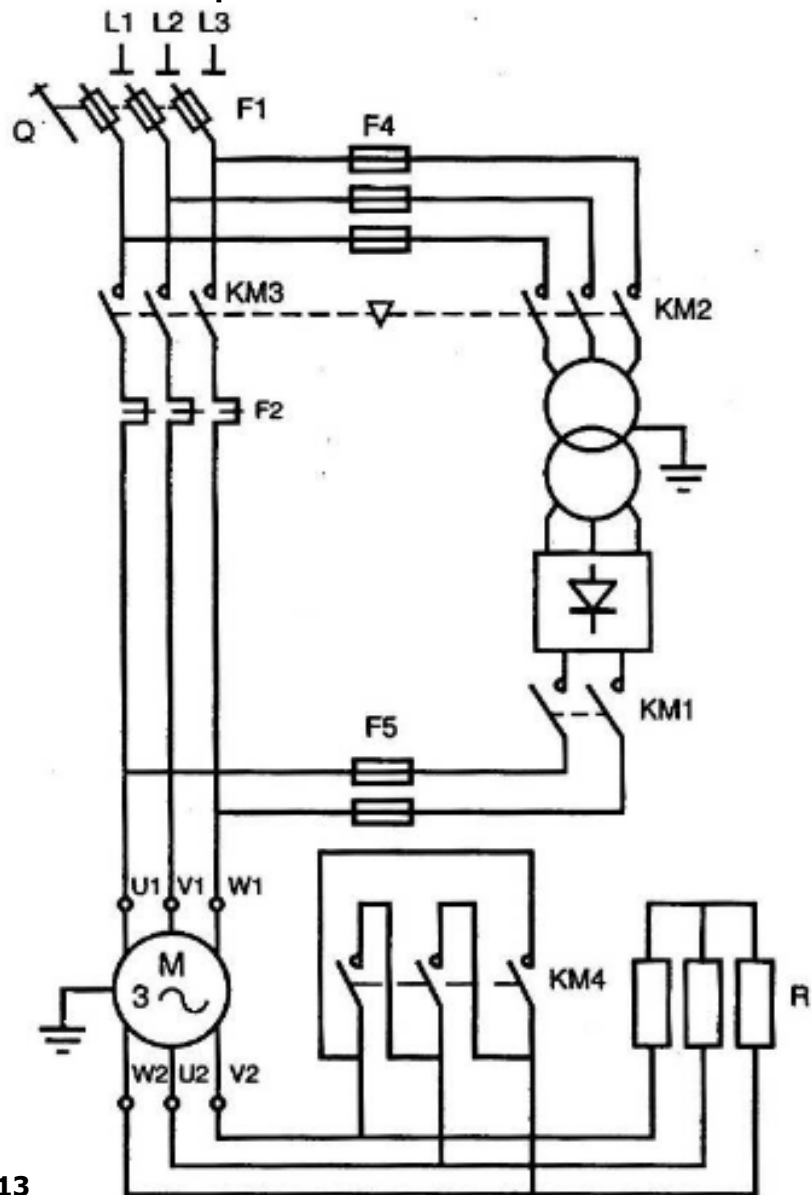
Inconvénients:

- nécessite de couper le courant continu dans le stator du moteur afin d'éviter l'échauffement.



Machine asynchrone triphasée

Circuit de puissance et circuit de commande:



S1: BP marche.
S2: BP arrêt freiné.
S3: BP arrêt non freiné.