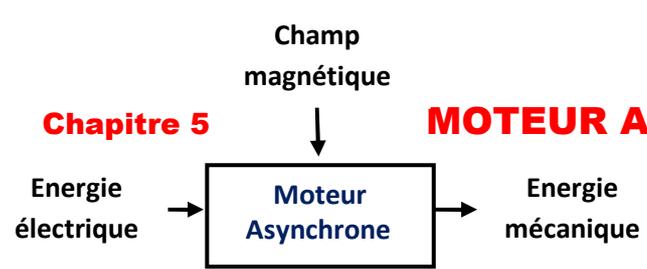




Chapitre 5

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

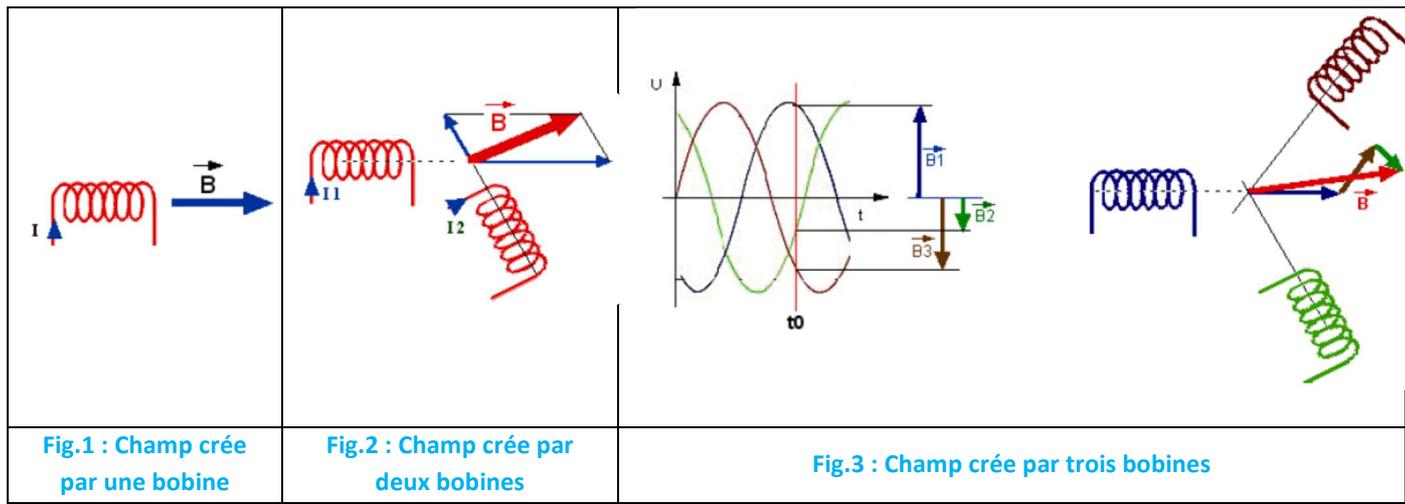


1. Généralités

Le principe des moteurs à courants alternatifs repose sur l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant I dans une bobine crée un champ magnétique B (voir Fig.1). Ce champ est porté par l'axe de la bobine, sa direction et son intensité dépendent du courant I . Si ce courant est alternatif, le champ varie en sens et en direction à la même fréquence du courant.

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ résultant est la somme vectorielle des deux champs.

Dans le cas d'un moteur triphasé, les bobines sont déposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs sont ainsi créés. Compte-tenu de la nature du courant triphasé, les trois champs sont déphasés. Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant, soit 50tr/s.



Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'industrie. Il est peu coûteux, on le fabrique en grande série. Il est robuste et son entretien est très limité. Il est sûr : son fonctionnement ne génère pas d'étincelles à la différence d'un moteur à courant continu. Ce type de moteur équipe la quasi totalité des machines-outils classiques (tours, fraiseuses, bobineuses, tapis roulants, pompes, compresseurs, perceuses,...).

Force de Laplace

Un conducteur électrique de longueur L , soumis à un champ magnétique B et traversé par un courant d'intensité I , subit une force électromagnétique F appelée **force de Laplace** (Le sens est donné par la règle de la **main droite**) qui tend à **le mettre en mouvement**.

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha$$

F en newtons (**N**), I en ampères (**A**), L en mètre (**m**), B en tesla (**T**). Avec α l'angle entre la direction du champ et le fil.

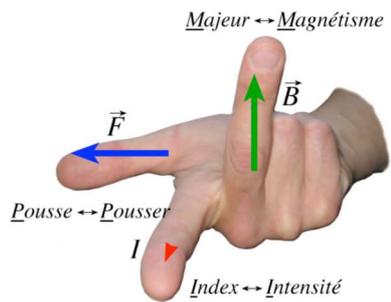


Fig.4 : Force de Laplace

Fig.5 : Règle de la main droite

2. Constitution et principe de fonctionnement

Le moteur asynchrone est constitué de deux parties distinctes : le **stator** et le **rotor**. L'espace entre le stator et le rotor est appelé **entrefer**.

Stator (partie fixe du moteur) : Il est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme :

$n_s = \frac{f}{p}$	n_s : vitesse de synchrone de rotation du champ tournant en tr/s . f : fréquence des courants alternatifs en Hz, et $\omega = 2.\pi.f$ en rad/s p : nombre de paires de pôles.
---------------------	--

Le rotor, soumis à ce champ tournant, génère des courants induits qui, conformément à la loi de Lenz, s'opposent à cette rotation en entraînant la rotation du rotor dans le même sens, à la vitesse Ω (à la fréquence n).

Remarque : En charge, cette vitesse Ω est toujours légèrement inférieure à Ω_s .

Rotor (partie mobile du moteur) : Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il existe deux types de rotor.

✚ Rotor à cage d'écureuil

Il porte un ensemble de barres conductrices, très souvent en aluminium, logées dans un empilement de tôles. Les extrémités des barres sont réunies par deux couronnes conductrices.

Le rotor en cage d'écureuil présente une résistance très faible : on dit qu'il est court-circuité.

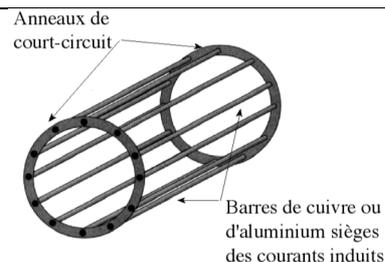


Fig.6 : Rotor à cage d'écureuil

✚ Rotor bobiné

Le rotor comporte des encoches dans lesquelles sont logés des conducteurs formant un enroulement triphasé.

Les enroulements sont généralement accessibles par l'intermédiaire de 3 bagues et de 3 balais, permettant ainsi de modifier les caractéristiques de la machine.

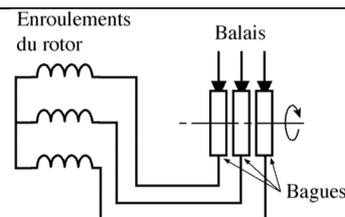


Fig.7 : Rotor bobiné

✚ Couplage sur le réseau

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone, il apparaît une indication concernant les tensions (ex : 127V/230V). Cela signifie que, quelque soit le réseau, chaque enroulement doit être soumis, au régime nominal, à la tension correspondant à la valeur indiquée la plus faible (ici 127V). En fonction du réseau, il faudra donc réaliser le couplage adapté.

Exemple : Indication sur la plaque signalétique : 230V/400V, chaque enroulement doit donc être soumis à **230 V**.

✚ Schéma de branchement

Les moteurs triphasés possèdent 3 enroulements qui sont reliés à 6 bornes repérées U1, V1, W1 et U2, V2, W2 ; le positionnement de trois barrettes permet d'alimenter le moteur sous deux tensions différentes.

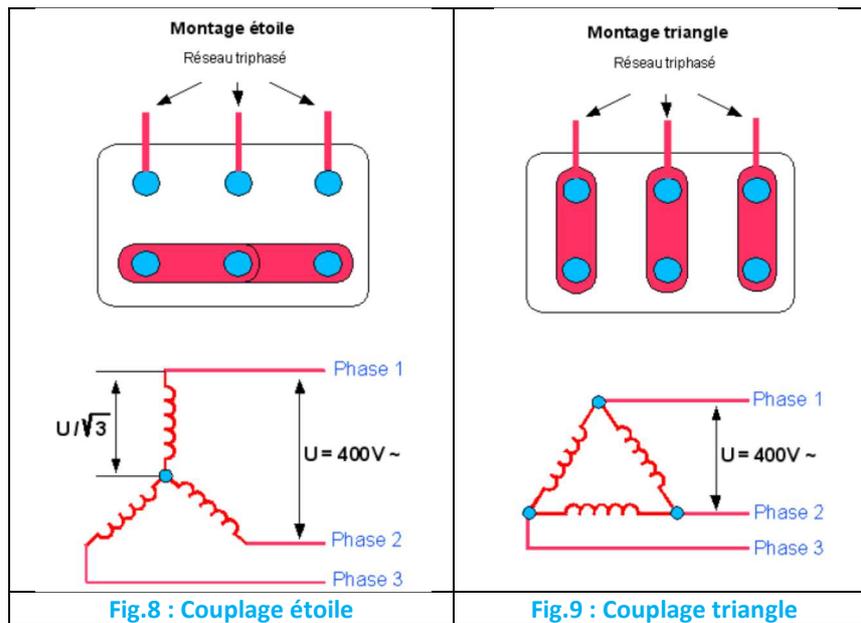


Fig.8 : Couplage étoile

Fig.9 : Couplage triangle

Glissement

$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$	n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s)	$n = (1 - g)n_s$
	n : vitesse de rotation du rotor (tr/s)	$n = 0 \Rightarrow g = 1$
	n_g : vitesse de glissement (tr/s) $n_g = n_s - n$	$n = n_s \Rightarrow g = 0$

Fréquence des courants induits

Le rotor voit un champ statorique tournant à la fréquence de glissement : $n_g = g \cdot n_s$. Soit : $f_g = g \cdot f = f_r$

Symboles

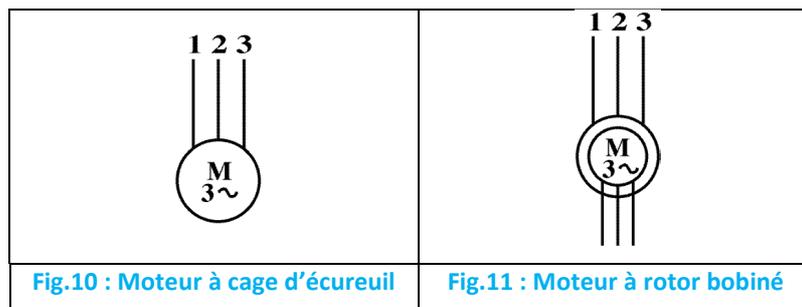
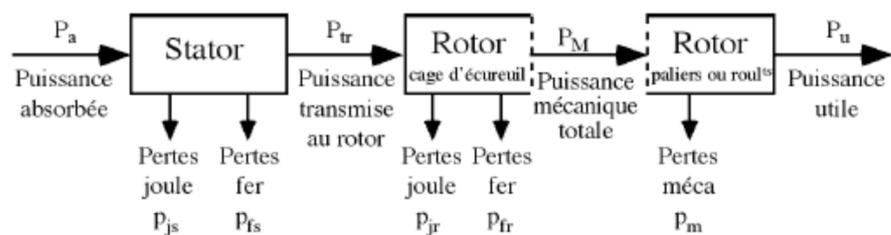


Fig.10 : Moteur à cage d'écuréuil

Fig.11 : Moteur à rotor bobiné

3. Bilan des puissances



Puissances électriques	$P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi$ $Q_a = \sqrt{3}UI\sin\varphi$
------------------------	--

absorbées	$S_a = \sqrt{3} UI$
Puissance transmise au rotor	Cette puissance est transmise au rotor par le couple électromagnétique $P_{tr} = P - P_{fs} - P_{js} = T_{em}\Omega_s$ avec : T_{em} : moment du couple électromagnétique en Nm . Ω_s : vitesse angulaire de synchronisme ($2\pi.n$) en rad/s .
Pertes par effet joule au stator	Si r est la résistance d'une phase du stator : $P_{js} = 3rI^2$ pour le couplage étoile $P_{js} = 3rI^2$ pour le couplage triangle Si R est la résistance entre phase du stator couplé et I l'intensité en ligne alors : $P_{js} = \frac{3}{2} RI^2$
Puissance mécanique totale P_M	Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω . Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M . $P_M = T_{em}\Omega$ soit : $P_M = T_{em}\Omega = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \cdot \Omega = P_{tr}(1 - g)$ $P_M = P_{tr}(1 - g)$: Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.
Pertes joules et pertes dans le fer au rotor	$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = gP_{tr}$ $P_{jr} \approx gP_{tr}$: Les pertes fer du rotor sont négligeables.
Pertes collectives pc	Ces pertes ne dépendent que de U , f et n . Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi. $P_c = P_{fs} + P_m$
Couple de perte	Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine. $T_C = \frac{P_c}{\Omega_s}$
Puissance Utile	$P_u = P_M - P_m = T_u \cdot \Omega$ $P_u = P_a - \sum \text{Pertes}$
Rendement	$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} - P_m}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega}{\sqrt{3} UI \cos\varphi}$

4. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne aucune charge. Conséquences :

$$T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$$

$$g = 0 \Rightarrow P_{jr} = 0$$

$$P_{a0} = \sqrt{3} UI_0 \cos\varphi_0$$

$$P_{a0} = P_{js} + P_{fs} + P_{jr} + P_m = P_{js} + P_{fs} + P_m$$

$$P_{js0} = \frac{3}{2} RI_0^2 \approx 0 \text{ car } I_0 \text{ est faible} \Rightarrow P_{a0} = P_{fs} + P_m$$

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives

5. Fonctionnement en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor. En régime permanent, Le couple moteur sera égal au couple résistant : $T_u = T_r$

Remarque : Le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

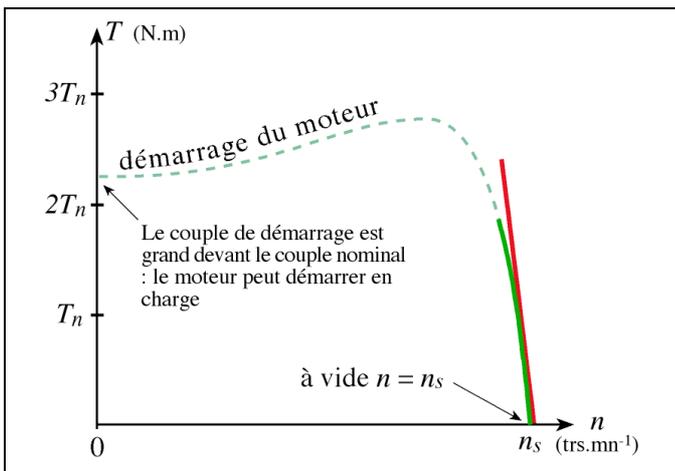


Fig.12 : Caractéristique mécanique $T=f(n)$

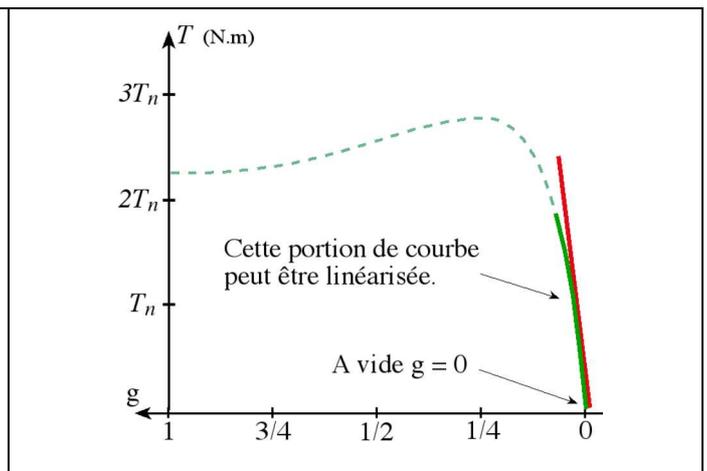


Fig.13 : Caractéristique mécanique $T=f(g)$

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge.

Le point de fonctionnement ($T ; n$) permet de calculer très facilement le glissement et la puissance utile dans ce cas bien précis.

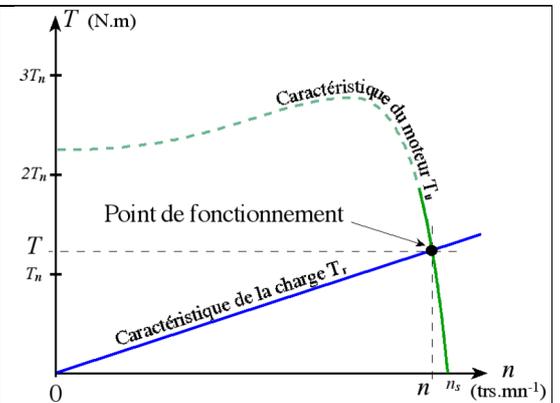


Fig.14 : Point de fonctionnement d'un moteur asynchrone

6. Démarrage du moteur asynchrone triphasé

6.1. Démarrage direct

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant I_D sur le réseau est souvent important (4 à 8In). Cette forte intensité peut provoquer des chutes de tension en ligne. C'est le cas du démarrage direct.

Le démarrage direct est utilisé lorsque le courant à la mise sous tension ne perturbe pas le réseau.

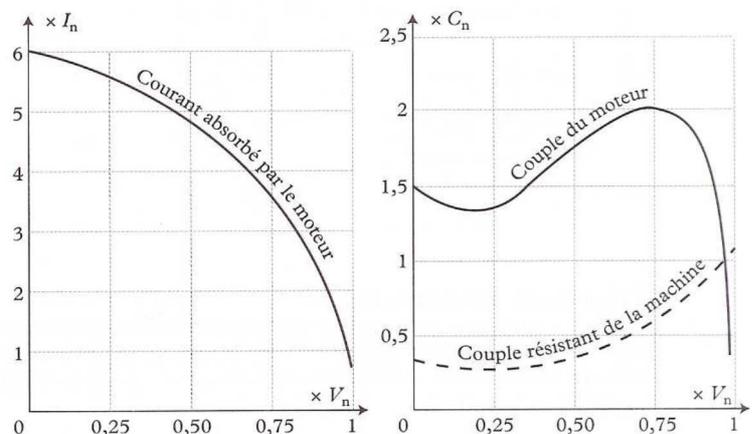
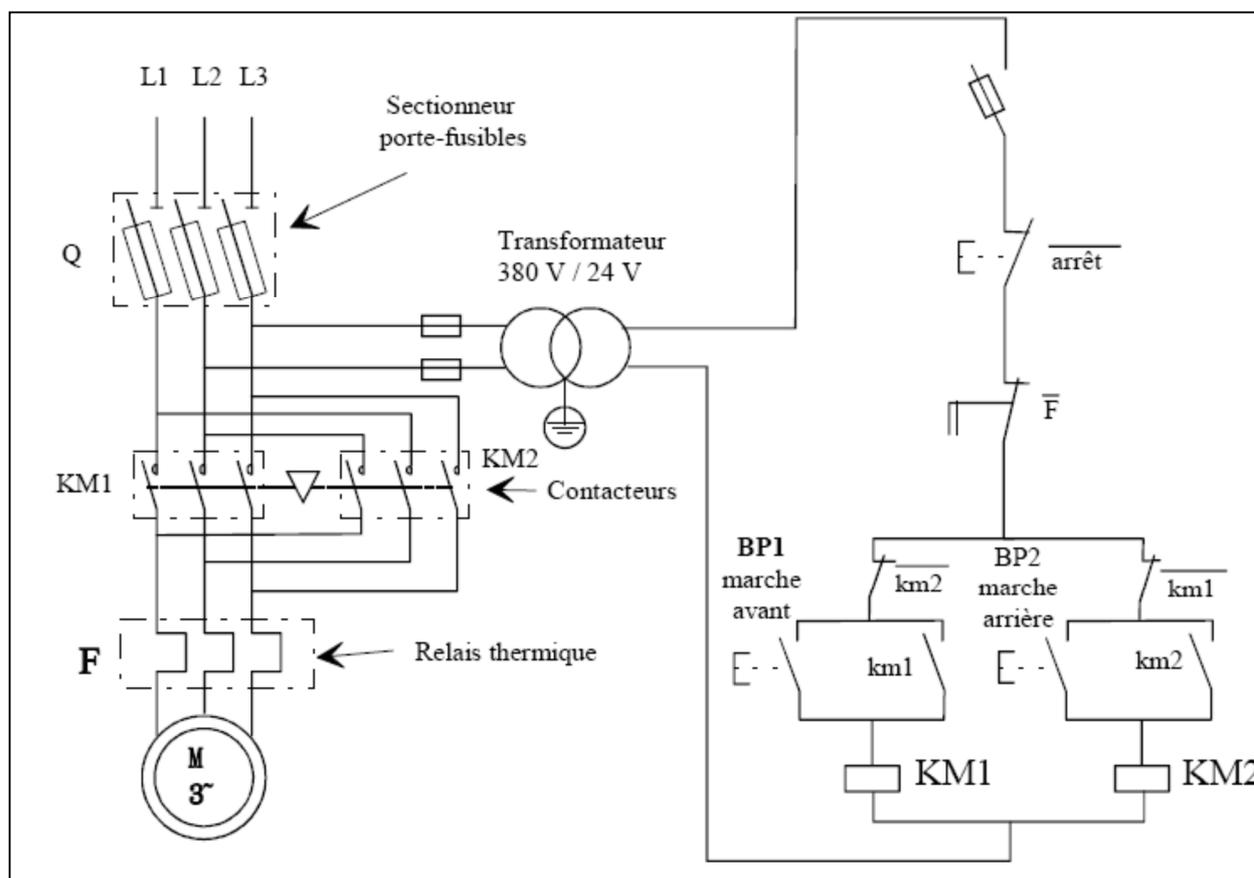


Fig.15 : Démarrage direct du moteur asynchrone

✚ Exemple de schéma de mise en œuvre : Démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé en deux sens de marche.



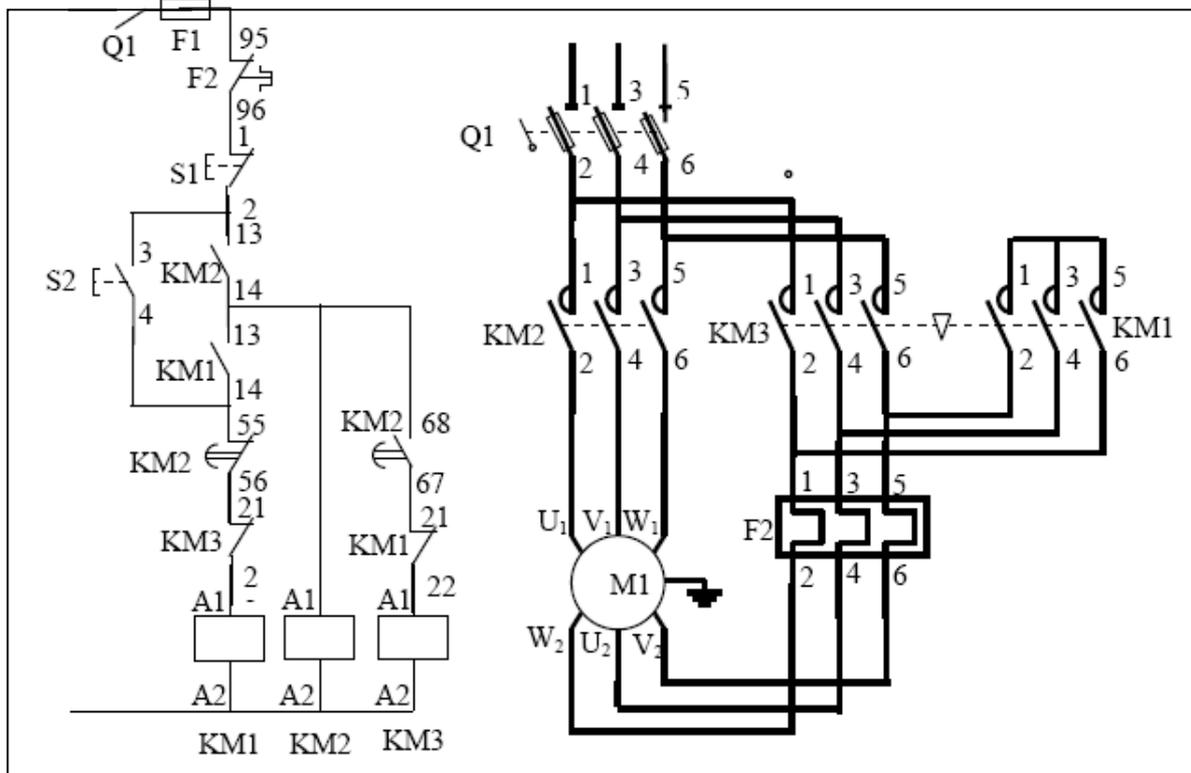
6.2. Démarrage étoile-triangle

Ce démarrage consiste à coupler le stator en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir le couplage en triangle

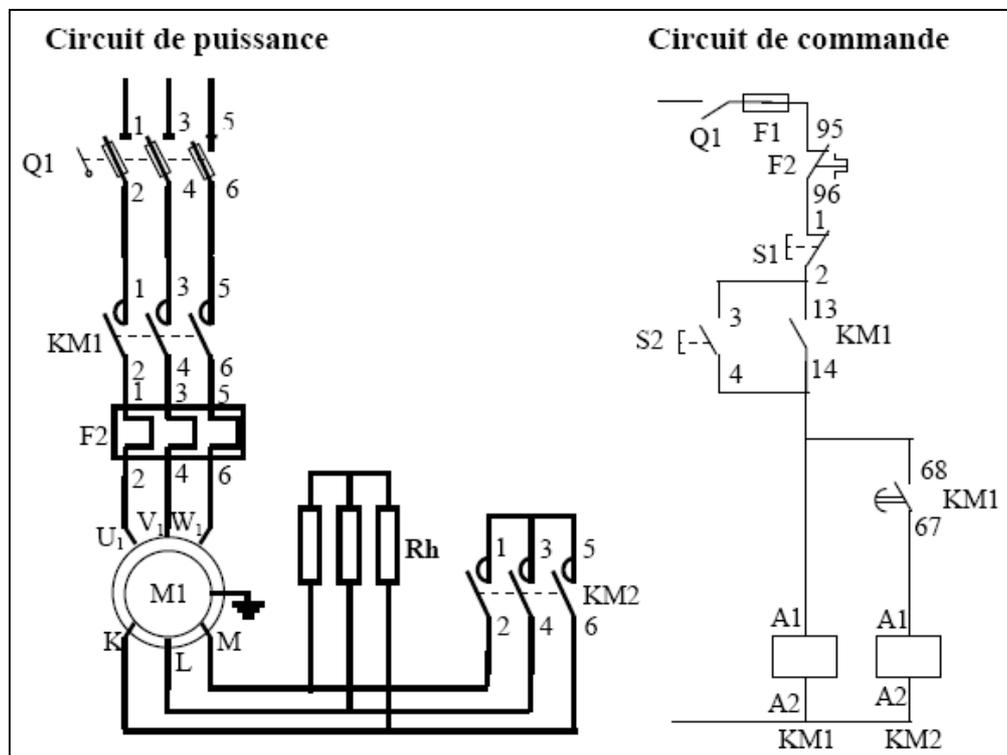
<p>✚ Première étape : on démarre en étoile, chaque enroulement reçoit une tension 3 fois inférieure à sa tension nominale. Conséquence : l'intensité absorbée est divisée par 3.</p> <p>✚ Deuxième étape : 2 à 3 secondes après, on bascule en triangle.</p> <p>Inconvénient : le couple au démarrage est également divisé par 3.</p>	
<p>Fig.16 : Démarrage étoile-triangle du moteur asynchrone</p>	

Ce procédé n'est possible que si le moteur a été conçu pour fonctionner en triangle sous la tension composée du réseau. Ce démarrage convient aux machines de moyenne puissance ($P < 50 \text{KW}$) démarrant de préférence à vide ou à faible couple résistant : ventilateurs, machines-outils....

✚ Exemple de schéma de mise en œuvre d'un démarrage étoile-triangle

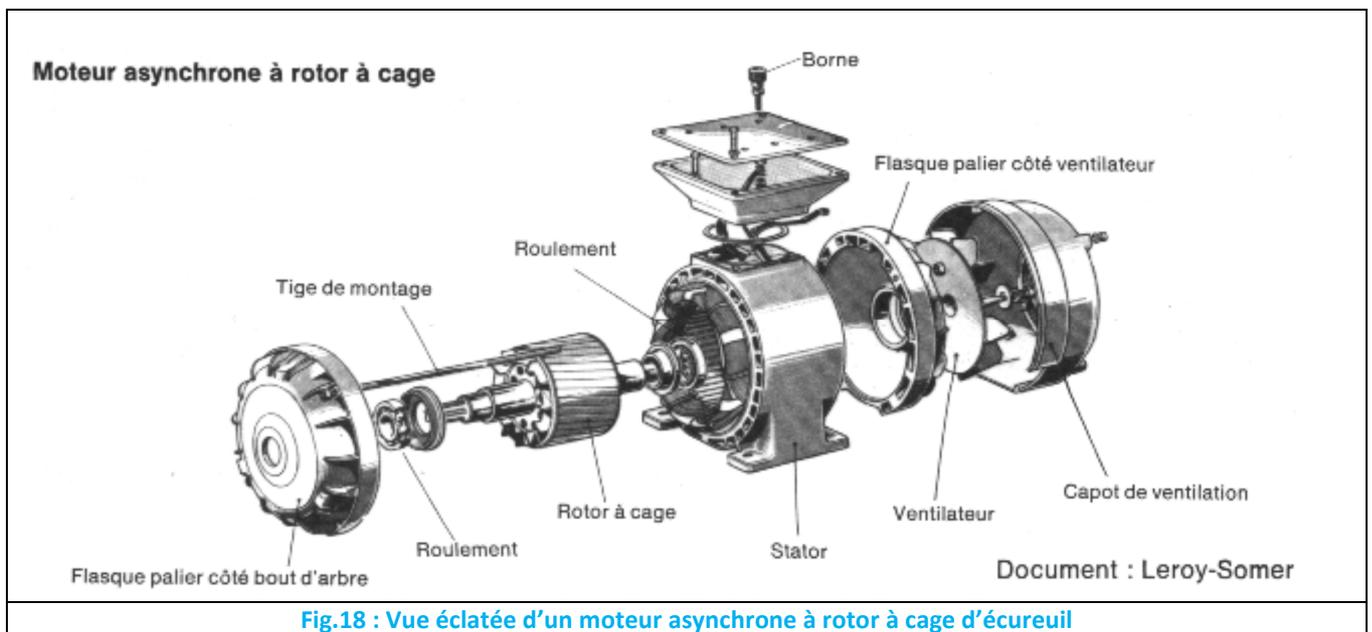
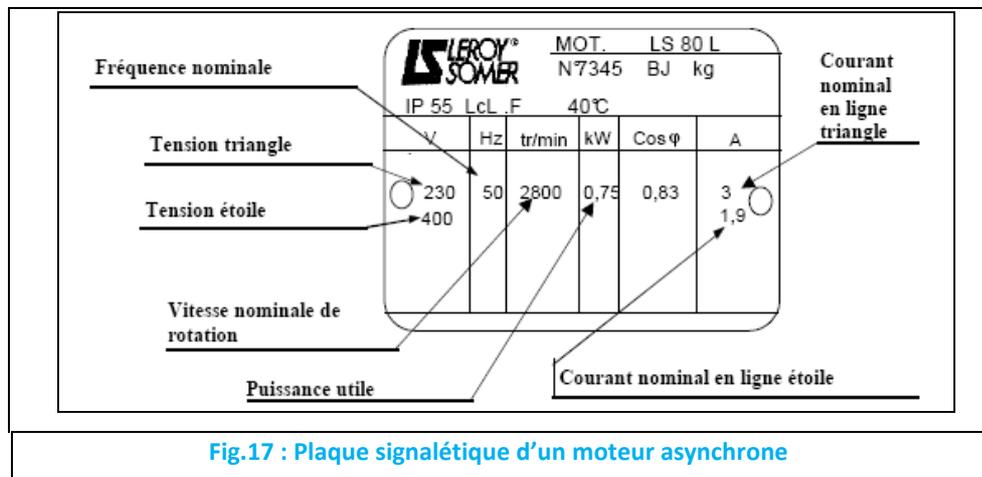


6.3. Démarrage rotorique



Ce type de démarrage est en voie de disparition, le meilleur choix économique étant le variateur électronique.

7. Plaque signalétique



8. Moteur asynchrone monophasé

Si on alimente deux bobines branchées en série en respectant bien le sens des enroulements, avec un courant alternatif monophasé de fréquence 50 Hz, on crée entre les bobines un champ alternatif de même fréquence.

Une aiguille placée dans ce champ vibre mais ne tourne pas. Si elle est lancée dans un sens ou dans l'autre, elle se met à tourner à la fréquence de synchronisme.

En monophasé le moteur peut tourner dans un sens ou l'autre. De ce fait il a également du mal à démarrer tout seul. Il faut prévoir un dispositif supplémentaire qui lui permettra de démarrer tout seul dans un sens déterminé. Il s'agit souvent d'un enroulement ou de spires auxiliaires.

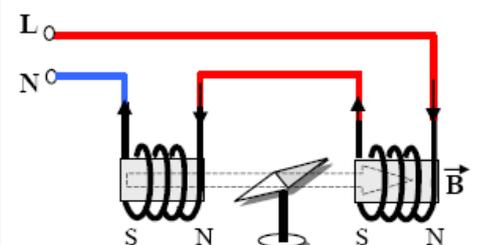


Fig.19 : Principe du moteur asynchrone monophasé

9. Réglage de la vitesse du moteur asynchrone

La vitesse de synchronisme n_s dépend de la fréquence f_s des courants statoriques. Et comme la vitesse n reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence f_s .

En réalité pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport $\frac{V_s}{f_s}$ constant (V_s est la tension d'alimentation d'un enroulement).

Si on veut augmenter la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

On obtient le réseau de caractéristiques. La zone utile est l'ensemble des segments de droites parallèles. Sur le plan technique, cela permet un très bon réglage de la vitesse.

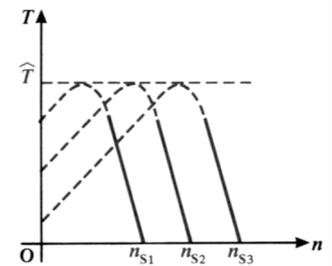


Fig.20 : Réseau de caractéristiques $T=f(n)$ du moteur asynchrone

10. Caractéristiques $T=f(n)$ de quelques charges

<p>Machine à puissance constante</p>	<p>$T_r = \frac{k}{N}$</p>	<p>$P = k$</p>
<p>Machine à couple constant</p>	<p>Couple constant $T_r = k$</p>	<p>Puissance $P = k.N$</p>
<p>Machine à couple proportionnel à la vitesse</p>	<p>$T_r = k.N$</p>	<p>$P = k.N^2$</p>
<p>Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse</p>	<p>$T_r = k.N^2$</p>	<p>$P = k.N^3$</p>

11. Modèle équivalent d'un moteur asynchrone

Il est important, au préalable, de rappeler l'expression de la fréquence des courants induits au rotor : $f_r = g \cdot f$

La machine asynchrone est constituée de deux ensembles de bobinages triphasés enroulés sur le même circuit magnétique. Par analogie, on peut alors considérer qu'elle est équivalente, à l'arrêt, à un transformateur triphasé. On représente sur la figure 21 ci-dessous, le schéma de principe correspondant ainsi que le schéma monophasé équivalent obtenu à partir de l'analogie avec un transformateur. On note sur ce schéma les éléments d'imperfection classiques : résistances séries des bobinages primaires et secondaires, idem pour les inductances de fuites. Par contre, on représente le transformateur équivalent comme une simple inductance mutuelle entre le primaire et le secondaire.

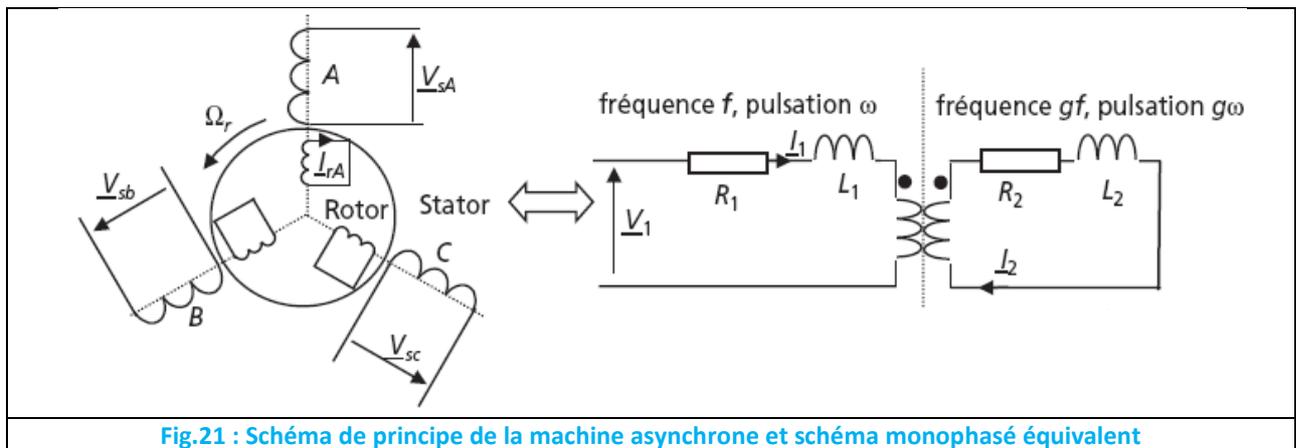


Fig.21 : Schéma de principe de la machine asynchrone et schéma monophasé équivalent

Il faut bien noter que, lorsque la machine tourne, les fréquences des courants et des tensions au primaire et au secondaire du transformateur équivalent ne sont pas les mêmes.

Les relations de maille s'écrivent :

+	Au primaire :	$\underline{V}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jL_1 \omega \underline{I}_1 + j\omega \underline{\Phi}_1$
+	Au secondaire :	$0 = R_2 \underline{I}_2 + jL_2 g \omega \underline{I}_2 + jg\omega \underline{\Phi}_2$

En pratique, pour construire un schéma équivalent final simplifié, on divise l'équation de maille secondaire par le glissement g , ce qui fait apparaître une inductance de fuite équivalente à la fréquence f .

$$0 = \frac{R_2}{g} \underline{I}_2 + jL_2 \omega \underline{I}_2 + j\omega \underline{\Phi}_2$$

Les fréquences du primaire et du secondaire étant alors identiques. On retiendra donc le schéma monophasé équivalent simplifié représenté sur la figure 22 ci-dessous.

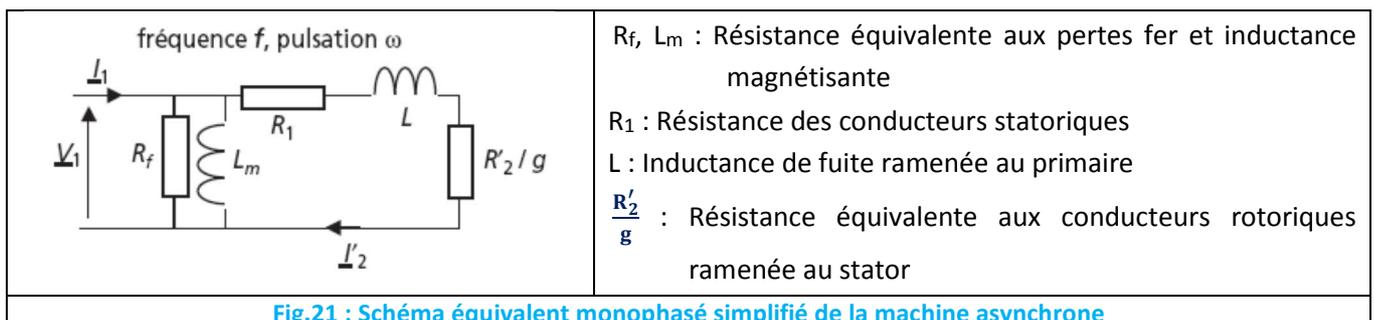


Fig.21 : Schéma équivalent monophasé simplifié de la machine asynchrone