

# **Le moteur asynchrone**

## **Table des matières**

Introduction

Principe de fonctionnement et constitution

Caractéristiques et relations fondamentales

Démarrage des moteurs asynchrones

La variation de vitesse des moteurs asynchrones

Les variateurs de vitesse électronique « Altivar »

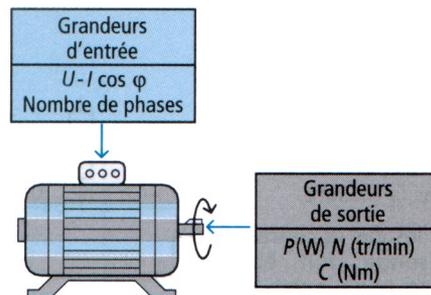
# 1 Rappels

## Moteur asynchrone

Panneau d'affichage  
publicitaire

### 1. Introduction

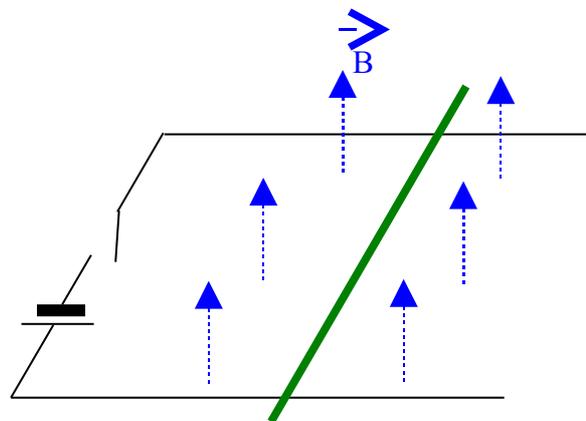
Le moteur asynchrone transforme l'énergie électrique apportée par le courant alternatif monophasé ou triphasé en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et des grandeurs de sortie qui sont mécaniques.



La conversion de l'énergie électrique s'effectue à 80% à l'aide de moteurs asynchrones triphasés grâce à leur simplicité de construction, à leur robustesse et à leur facilité de démarrage.

Pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, les moteurs, ou machines tournantes, utilisent les lois de l'électromagnétisme, et en particulier la loi de Laplace.

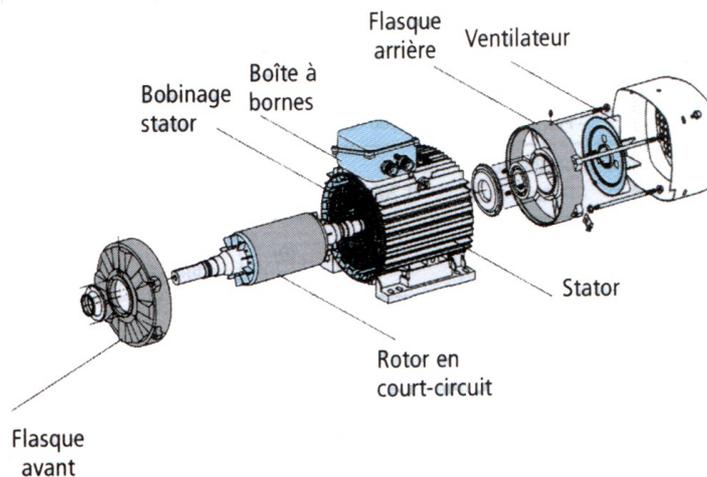
En effet, l'action d'un champ magnétique sur un courant électrique produit une force  $F$  égale à  $B.i.l$  (avec  $l$  longueur en mètres).



**Dessiner rotor et appliquer à la rotation (fig 6 p225)**

## 2. Principe de fonctionnement et constitution.

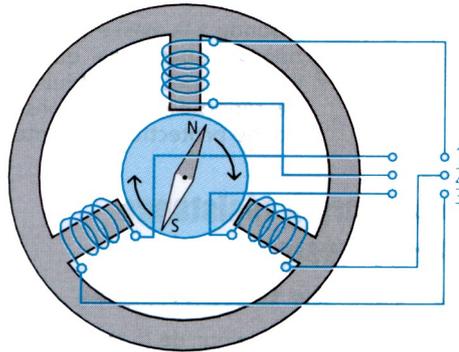
Quels que soient les constructeurs de machine tournante, nous constatons une très grande stabilité des techniques de construction. Par contre, les adaptations de moteurs à différentes applications sont de plus en plus nombreuses : moto-réducteur, moteur-frein, moto-pompe, génératrice asynchrone, ...



On classe les différentes pièces rencontrées dans toutes machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées :

- Organes électriques :
  - *Circuit rotorique, en court-circuit ou bobiné*
  - *Circuit statorique bobiné*
  - *Plaque à bornes*
- Organes magnétiques :
  - *Circuit magnétique statorique et rotorique*
- Organes mécaniques :
  - *Carcasse supportant les flasques*
  - *Roulements*
  - *Arbre*
  - *Ventilateur*
  - *Tiges de montage*
  - *Fixation du moteur*

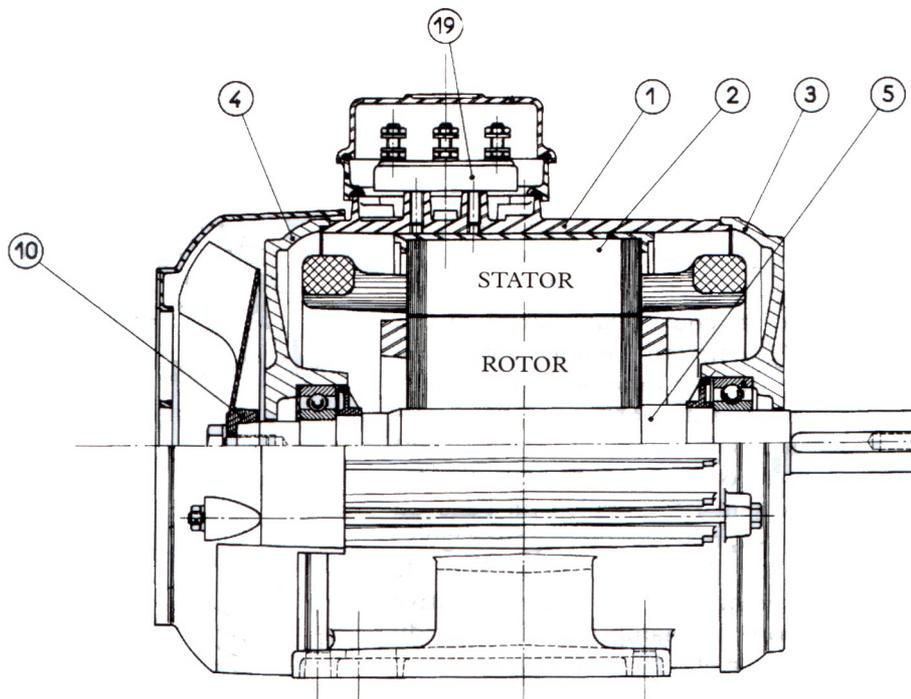
Le principe de fonctionnement du moteur nécessite la création d'un champ tournant en triphasé :



Sur ce schéma, le stator est représenté en gris et le rotor en bleu.

Trois bobines identiques placées à  $120^\circ$  sur le stator et alimentées par une tension alternative créent trois champs alternatifs qui, lorsqu'ils sont composés, forment un champ tournant. Ce champ tournant peut entraîner en rotation une aiguille aimantée.

Le rotor est constitué d'un disque en aluminium ou en cuivre. Le champ tournant, issu des bobines du stator, induit dans le disque des courants. L'interaction de ces courants et du champ magnétique tournant crée un couple moteur qui provoque la rotation du rotor à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant : on dit qu'il y a « glissement ».



Document Leroy-Somer

1 : carcasse à pattes

2 : Stator bobiné

3 : Flasque côté bout d'arbre

4 : Flasque côté ventilateur

5 : Arbre avec rotor

10 : Ventilateur

19 : Plaque à bornes

### 3. Caractéristiques et relations fondamentales

On utilisera les notations suivantes :

- U : tension entre phases en volts
- I : courant absorbé dans une phase du stator en ampères
- $\varphi$  : angle de déphasage entre le courant et la tension
- $P_e$  : puissance électrique du moteur en watts
- P : Puissance nominale du moteur en watts
- $\eta$  : rendement
- f : fréquence des grandeurs électriques statoriques en hertz
- $\omega$  : pulsation des grandeurs électriques statoriques en rd/s
- p : nombre de paires de pôles du moteur
- $\Omega_s$  : vitesse angulaire de synchronisme en rd/s
- $\Omega$  : vitesse angulaire de rotation du moteur en rd/s
- N : vitesse de rotation du rotor en tr/min
- g : glissement
- C : couple mécanique nominal fourni par le moteur en N.m
- $C_m$  : couple maximum en N.m
- $C_d$  : couple de démarrage en N.m
- $I_d$  : courant appelé au démarrage en ampères.

On rappelle les relations suivantes :

**Puissance électrique absorbée :**

$$P_e = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{en triphasé}$$

**Pulsation des grandeurs électriques statoriques :**

$$\omega = 2\pi f$$

**Vitesse angulaire de synchronisme :**

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

**Glissement :**

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

**Vitesse de rotation du rotor :**

$$N = \Omega \cdot \frac{60}{2\pi}$$

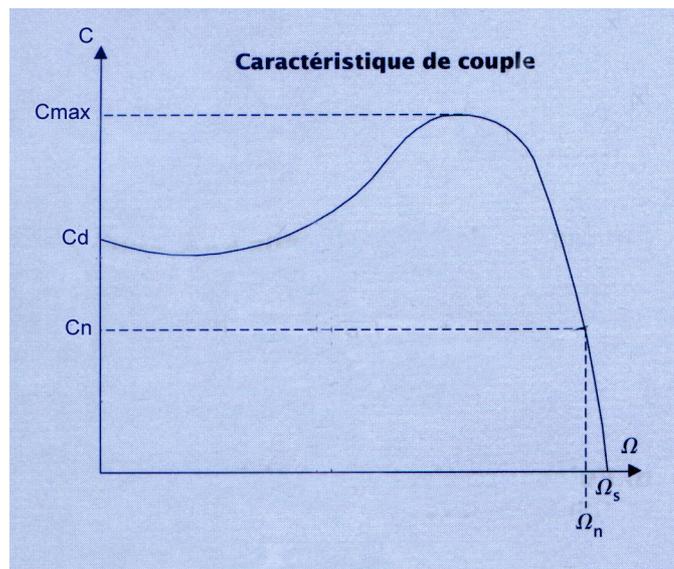
**Puissance nominale :**

$$P = C \cdot \Omega$$

$$P = \eta \cdot P_e$$

$$P = \eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

**Caractéristique de couple :**

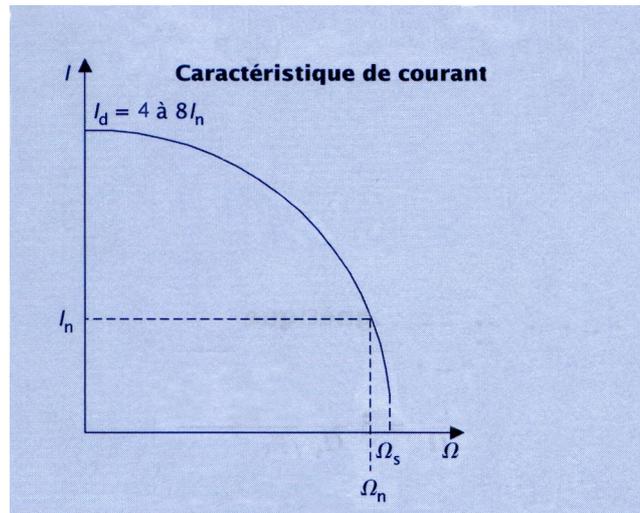


Les rapports donnés par les constructeurs sont en général :

$$0,6 \leq C_d/C \leq 1,5$$

$$2 \leq C_m/C \leq 3$$

**Caractéristiques du courant :**



Le fort appel de courant au démarrage nécessite l'utilisation de protections adaptées (fusible de classe aM ou disjoncteur courbe D).

**Remarque sur le choix d'un moteur asynchrone (Indice de protection, environnement, fixation). Montrer exemple plaque signalétique.**

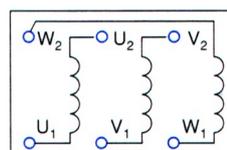
## 4. Démarrage d'un moteur asynchrone

Le moteur asynchrone possède un fort couple de démarrage, mais il a l'inconvénient d'absorber 4 à 8 fois son intensité nominale. Pour réduire cet appel de courant, on dispose de différents procédés de démarrage. Malheureusement ces techniques modifient également le couple de démarrage.

### 4.1. Rappel sur le couplage des moteurs

Le stator des moteurs asynchrones standards possède trois enroulements reliés à une plaque à bornes comportant six bornes repérées U1, V1, W1 et U2, V2, W2.

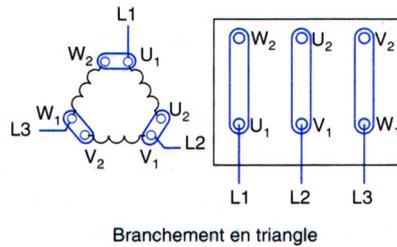
Les enroulements sont branchés de la manière suivante :



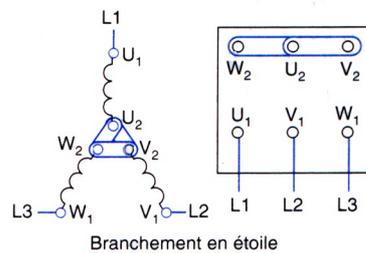
Branchement  
des enroulements

Deux systèmes de couplage sont alors possibles :

- le couplage en triangle ( $\Delta$ ) qui impose aux bornes d'un enroulement la tension composée du réseau :



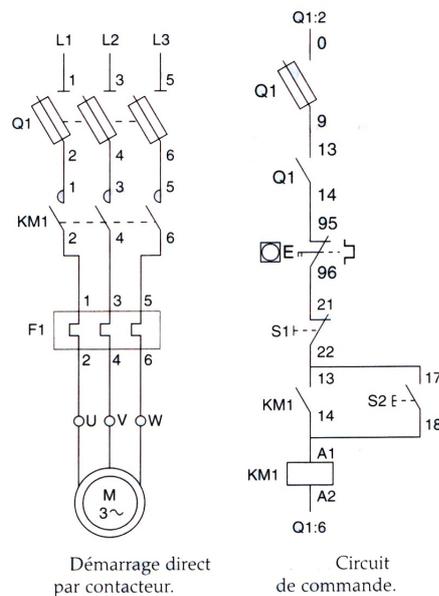
- le couplage en étoile (Y) qui impose aux bornes d'un enroulement la tension simple du réseau :



## 4.2. Le démarrage direct

Le démarrage direct est le procédé de démarrage le plus simple. Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau ; le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale.

Le schéma de câblage est le suivant :



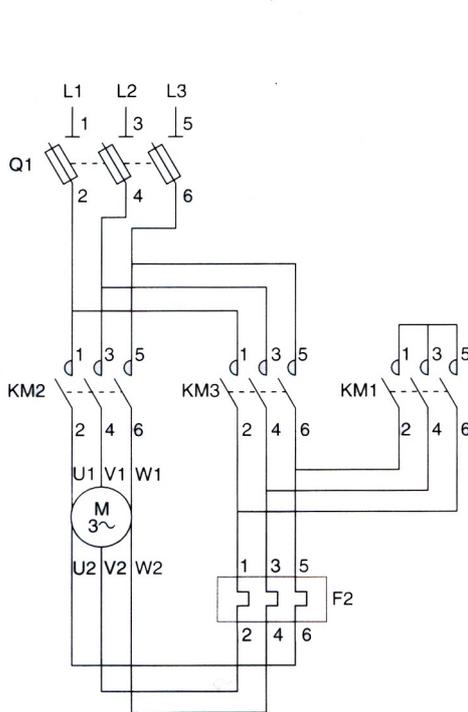
Comme vu précédemment, le courant de démarrage peut atteindre 4 à 8 fois le courant nominal. Le couple de démarrage vaut en moyenne 0,6 à 1,5 fois le couple nominal, mais cela dépend des données constructeurs.

### 4.3. Le démarrage étoile-triangle

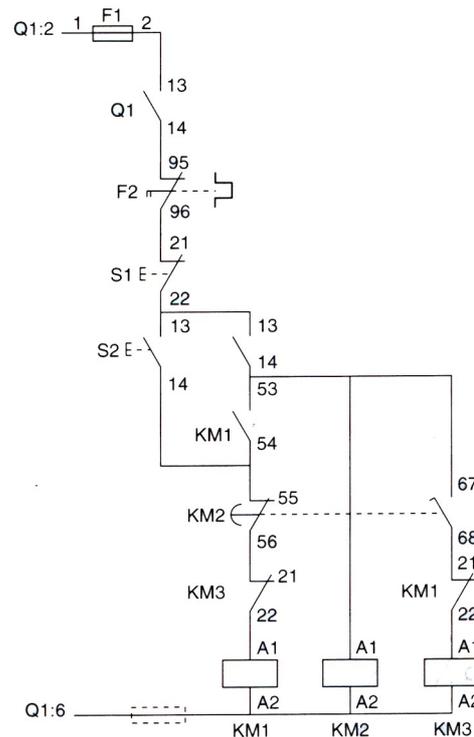
Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à borne, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau (soit pour un réseau 230V entre phases moteur 230/400V, et pour un réseau 400V entre phases moteur 400/690V).

Le démarrage s'effectue en deux temps. Premièrement, on couple les enroulements en étoile (cela revient à réduire la tension aux bornes des enroulements) et on met sous tension. Ensuite, par l'intermédiaire de contacteurs, on supprime le couplage étoile pour passer à un couplage triangle : le moteur est alimenté à pleine tension.

Le schéma de câblage est le suivant :



Circuit de puissance étoile-triangle.



Circuit de commande.

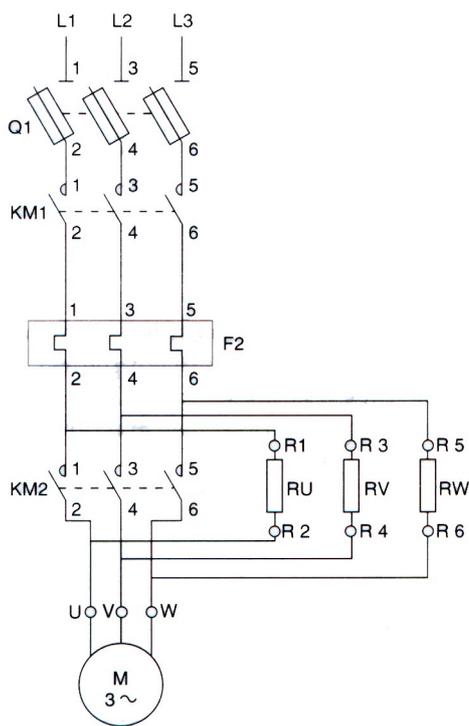
Le courant de démarrage est  $\sqrt{3}$  fois plus faible qu'en démarrage direct, mais le couple de démarrage est trois fois plus faible.

## 4.4. Le démarrage statorique

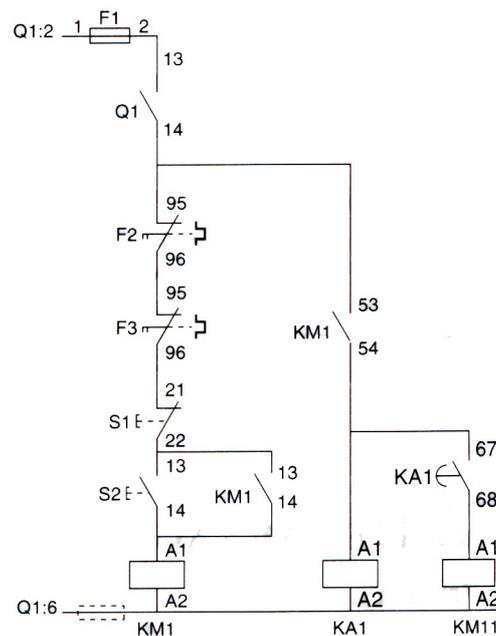
L'alimentation réduite est obtenue dans un premier temps par la mise en série d'une résistance dans le circuit. Cette résistance est ensuite court-circuitée.

L'intensité de démarrage n'est réduite que proportionnellement à la tension appliquée au moteur. Le couple moteur est quant à lui réduit comme le carré de la diminution de la tension.

Le schéma de câblage est donné ci-dessous :



Circuit de puissance  
du démarrage statorique.



Circuit de commande  
du démarrage statorique.

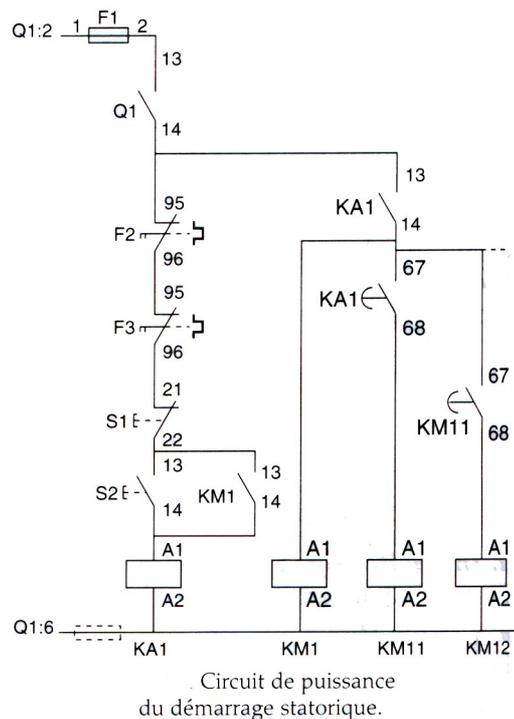
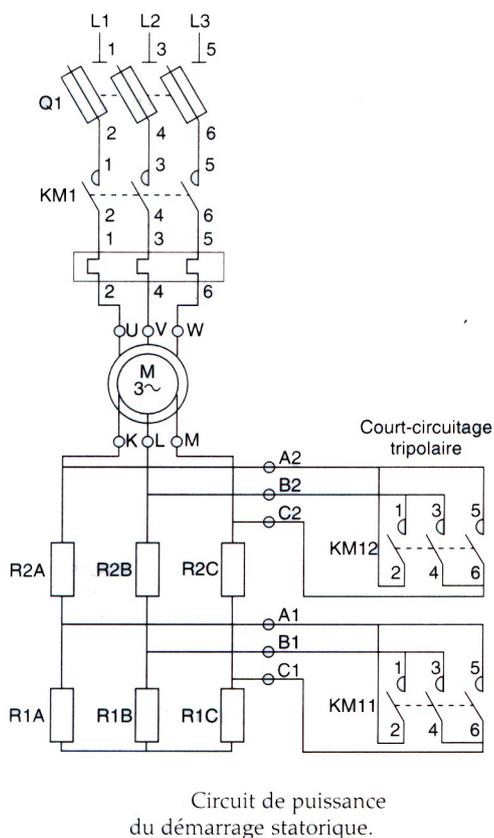
## 4.5. Le démarrage rotorique

Ce procédé de démarrage exige l'emploi d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné avec sortie de l'enroulement rotorique sur trois bagues.

On limite le courant absorbé au stator en augmentant la résistance du circuit du rotor. Des résistances montées en série dans le circuit du rotor sont éliminées au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse.

Le courant absorbé est sensiblement proportionnel à l'intensité nominale, et le couple de démarrage est de 2 à 2,5 fois le couple nominal.

Le schéma de câblage est le suivant :



## 4.6. Le démarrage sous tension réduite par auto-transformateur

A partir d'une certaine puissance, la réduction de l'intensité de démarrage est obtenue par un auto-transformateur qui adapte la tension d'alimentation du moteur.

Le coût du transformateur augmente le prix global de l'installation, ce procédé s'adresse donc aux fortes puissances.

L'intensité et le couple de démarrage sont choisis par le rapport de transformation.

## 4.7. Tableau récapitulatif

Les différents procédés vus précédemment sont récapitulés dans le tableau suivant :

Mode de démarrage	Direct	Étoile-Triangle	Statorique	Rotorique
Courant de démarrage	4 à 8 $I_n$	1,3 à 2,6 $I_n$	4,5 $I_n$	2,5 $I_n$
Couple de démarrage	0,6 à 1,5 $T_n$	0,2 à 0,5 $T_n$	0,6 à 0,85 $T_n$	2,5 $T_n$
Durée moyenne	2 à 3 s	3 à 7 s	7 à 12 s	2,5 à 5 s
Avantages	Démarrage simple et peu onéreux. Couple de démarrage important.	Bon rapport couple/courant. Relativement peu onéreux.	Pas de coupure d'alimentation. Réduction des pointes de courant.	Très bon rapport couple/courant. Pas de coupure d'alimentation.
Inconvénients	Pointe de courant importante. Démarrage assez violent.	Couple de démarrage faible. Coupure de l'alimentation en cours de démarrage.	Nécessité de résistances. Faible réduction de la pointe d'intensité.	Moteur à rotor bobiné plus onéreux. Nécessité de résistances.
Applications	Petits moteurs jusqu'à 5 kW.	Moteurs démarrant à vide ou avec de faibles charges.	Machines à forte inertie.	Démarrage progressif. Levage.

## 5. La variation de vitesse des moteurs asynchrones

On rappelle l'expression de la vitesse angulaire de rotation de l'arbre d'un moteur asynchrone :

$$\Omega = 2\pi (1-g) \cdot \frac{f}{p}$$

avec g, le glissement

f, la fréquence des grandeurs électriques statoriques en hertz  
et p le nombre de paires de pôles

On peut déduire de cette expression qu'il y a trois possibilités pour agir sur la vitesse d'un moteur : l'action sur p, l'action sur g et l'action sur f.

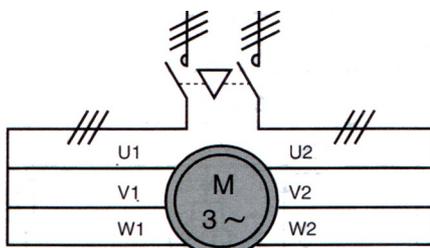
### 5.1. Action sur le nombre de pôles

Deux types de moteurs permettent une action sur le nombre de pôles :

- les moteurs à enroulements séparés : plusieurs bobinages sont insérés au stator et le nombre p de paires de pôles est différent pour chaque bobinage. A chaque bobinage alimenté, on obtient une vitesse de synchronisme différente, et, au glissement près, une vitesse du rotor différente.
- Les moteurs à couplage de pôles (Dalhander). Le stator est constitué de 6 bobinages et selon leur mode de connexion, on obtient  $p_1$  ou  $p_2$  paires de pôles par phase

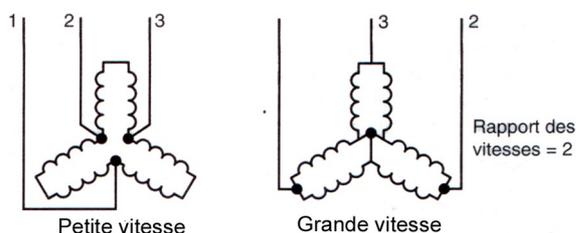
Le schéma de ces deux types de moteurs est donné ci-dessous :

Moteur à enroulements séparés :



*Inconvénient* : moteur volumineux et très onéreux.

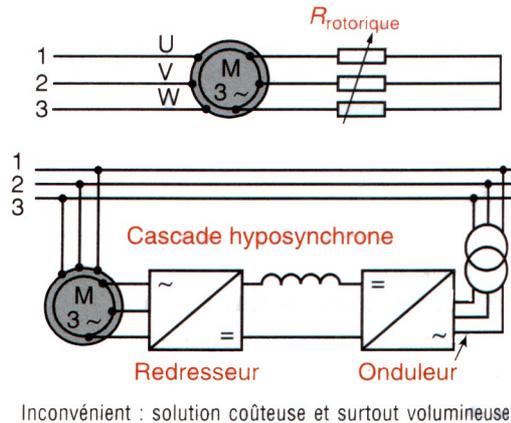
Moteur à couplage de pôles :



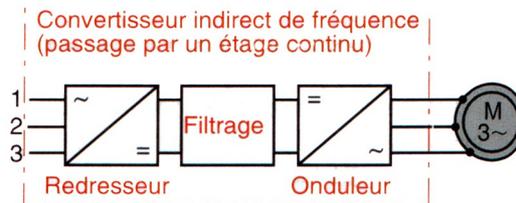
## 5.2. Action sur le glissement

Deux techniques existent :

- La première utilise un moteur à rotor bobiné. En insérant des résistances en série avec les enroulements rotoriques, le glissement varie. Ce procédé entraîne des pertes par effet joule importantes au rotor, le rendement est loin d'être optimal.
- La seconde méthode consiste à récupérer l'énergie perdue dans la première méthode pour la renvoyer sur le réseau. Ce système nécessite l'utilisation d'une cascade hyposynchrone qui permet de relier deux réseaux de fréquence différente (le rotor et le stator).



### 5.3. Action sur la fréquence.



Comme le montre ce schéma, cette technique nécessite l'insertion d'un convertisseur de fréquence entre le réseau et le stator du moteur. Cette solution est actuellement la plus répandue. Elle permet une grande souplesse de réglage de la vitesse du moteur asynchrone triphasé à cage. Pour conserver les performances du moteur (couple maximal disponible en permanence quelle que soit la vitesse), nous verrons dans la suite qu'une commande en « U/f » est nécessaire.

## 6. Les variateurs de vitesse électroniques « Altivar »

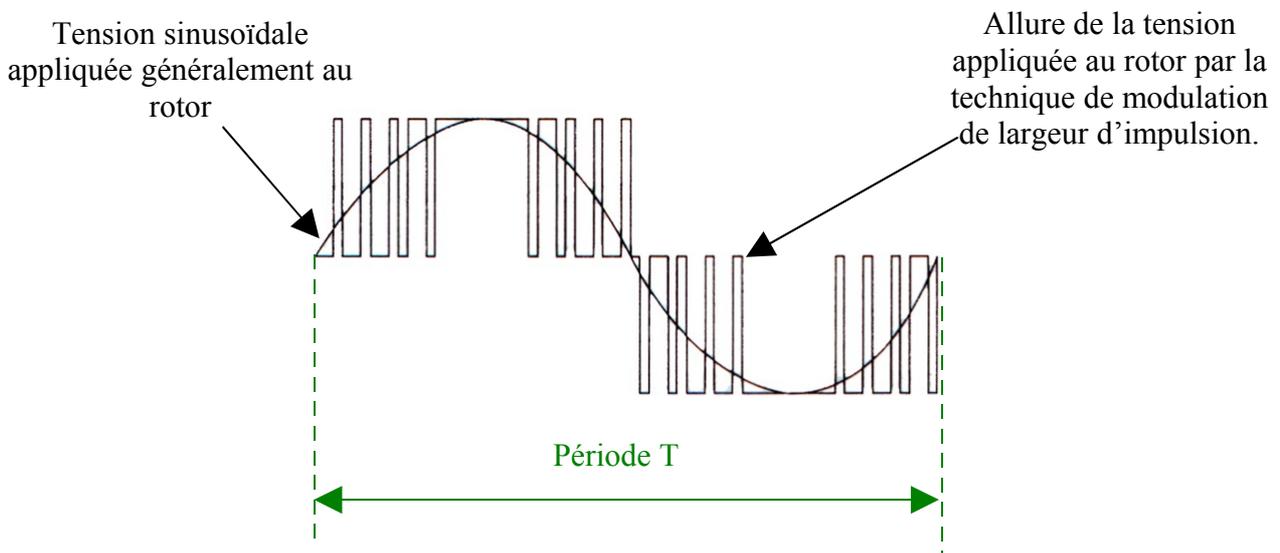
Les variateurs de vitesse électronique permettent de faire varier continuellement la vitesse de rotation des moteurs asynchrones dans leur plage de fonctionnement.

Ils permettent également un démarrage qui limite fortement l'appel de courant tout en conservant un couple  $C_d$  important (voir égal à  $C_m$ ).

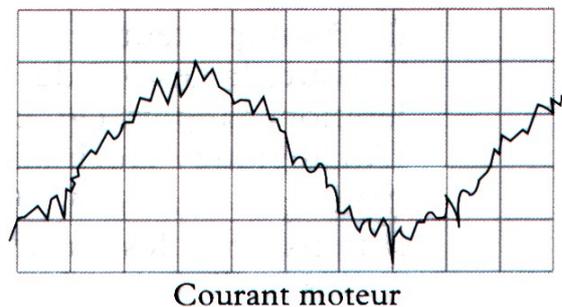
### 6.1. Variation de la vitesse

Le variateur utilise la technique de variation de la fréquence des grandeurs électriques statoriques (de la tension d'alimentation) (voir chapitre 5).

Pour faire varier cette fréquence, la technique de modulation par largeur d'impulsion est utilisée. Même si la tension d'alimentation du moteur n'est plus sinusoïdale (voir figure ci-dessous), le stator, composé d'enroulements (inductances et résistances), filtre les hautes fréquences du signal.



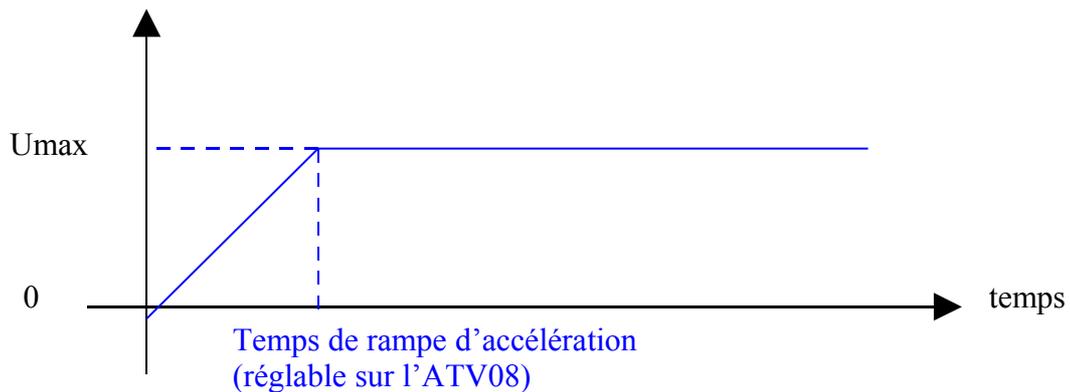
Ainsi, que l'une ou l'autre de ces tensions soit appliquée au moteur, le courant sera sinusoïdal et les performances du moteur seront équivalentes.



## 6.2. Démarrage progressif.

Pour limiter l'appel de courant, la tension d'alimentation est appliquée progressivement au stator. Une consigne de démarrage permet de régler la pente d'un signal en forme de rampe. Cette consigne est étalonnée en secondes, et impose le temps nécessaire à la valeur efficace de la tension d'alimentation pour varier de 0 à  $U_{max}$ .

Valeur efficace de la  
tension d'alimentation



### 6.3. Conservation d'un couple constant

Tous les moteurs électriques développent un couple qui est le produit d'un courant  $I$  par un flux magnétique  $\Phi$ .

$$C = k \cdot I \cdot \Phi$$

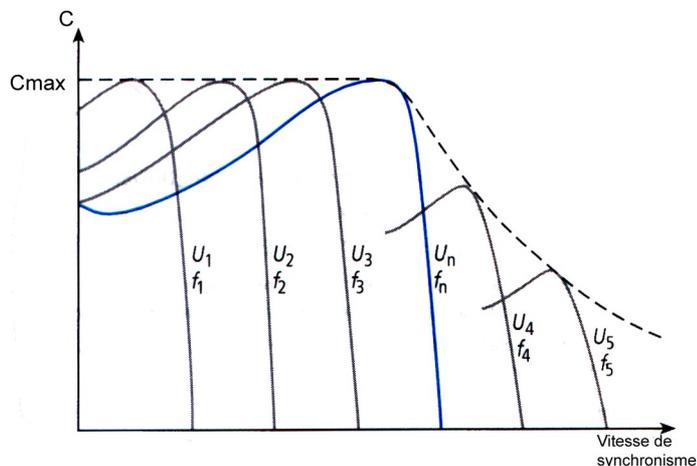
Dans le cas du moteur asynchrone, le flux dépend de  $U/f$ . On peut donc écrire  $C$  de la manière suivante :

$$C = K \cdot \frac{U}{f} \cdot I$$

D'après cette expression, on voit bien que si la fréquence  $f$  augmente et que la tension  $U$  reste constante, le couple disponible (et en particulier le couple maximum) diminue.

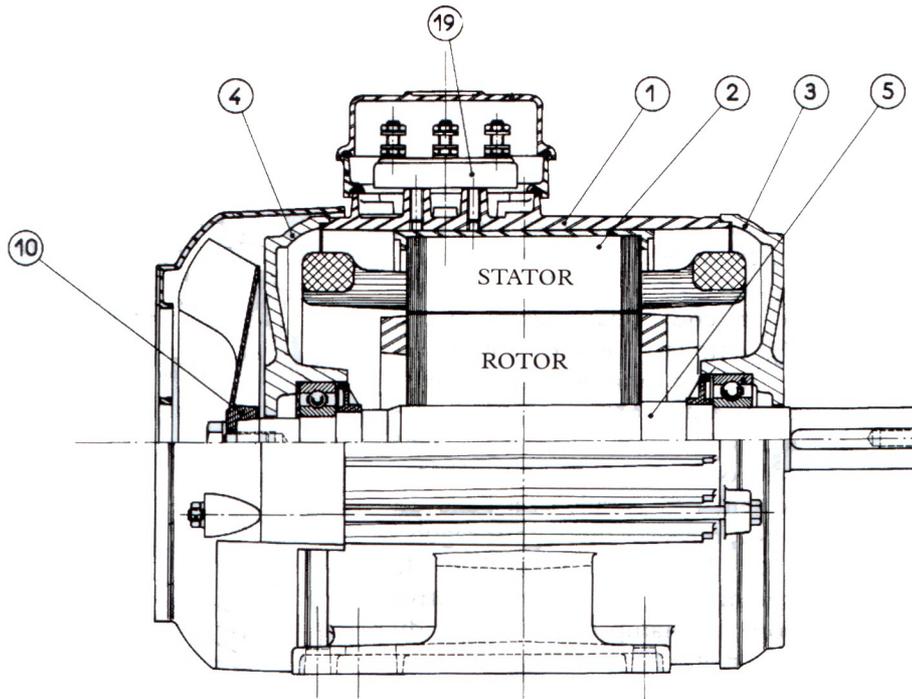
Pour augmenter la vitesse du moteur tout en gardant un couple disponible constant, il suffit de garder le rapport  $U/f$  fixe.

Ainsi, lorsque  $f$  varie (et donc  $U$  également puisque  $U/f$  est constant), la caractéristique de couple du moteur se translate. On obtient alors le réseau suivant :



**Remarque :**

- Ce rapport ne peut pas rester fixe sur toute la plage de fonctionnement. En effet :
- pour  $U$  nul,  $U/f$  vaut obligatoirement 0. Un système de compensation est alors utilisé par le variateur.
  - Si  $f$  augmente au-delà de 50 Hz (fréquence réseau), garder  $U/f$  constant signifie qu'on dispose d'une tension supérieure à la tension du réseau (ce qui n'est pas le cas). Donc au-delà de 50 Hz,  $U/f$  n'est plus fixe.



Document Leroy-Somer

1 : carcasse à pattes

2 : Stator bobiné

3 : Flasque côté bout d'arbre

4 : Flasque côté ventilateur

5 : Arbre avec rotor

10 : Ventilateur

19 : Plaque à bornes

