

Cours sur les Moteurs Asynchrones Triphasés

Les moteurs asynchrones triphasés sont les plus utilisés dans l'industrie à cause de leurs simplicités de construction, leur robustesse ainsi que leur coût d'entretien qui est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs.

I. SYMBOLE

Voici les deux symboles employés pour représenter la machine asynchrone

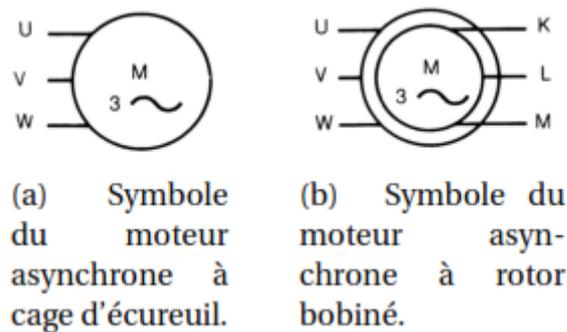


Figure 1 : Symboles des moteurs asynchrones

II. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les machines asynchrones triphasées souvent appelées machines à induction peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties principales :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents ensembles.

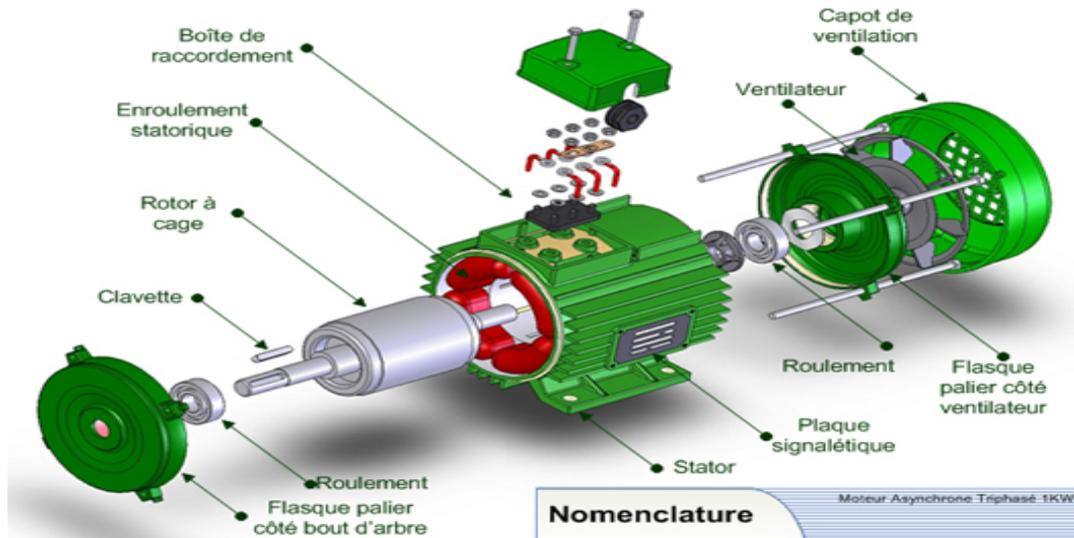


Figure 2 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

II.1. Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage est terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits en cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches.

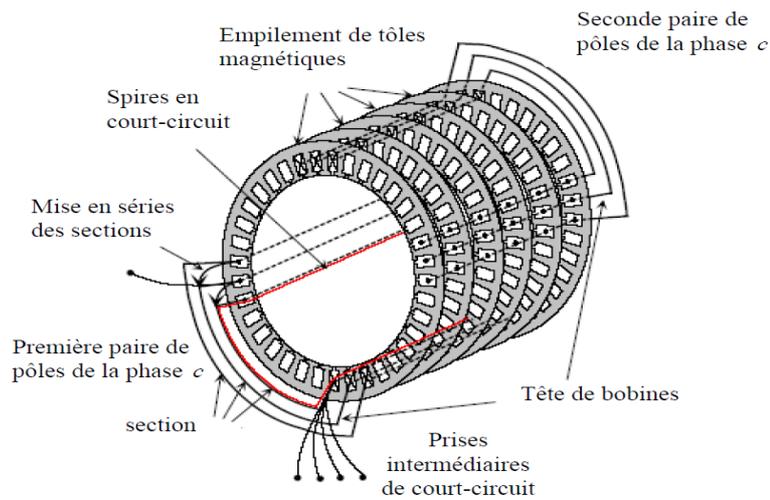
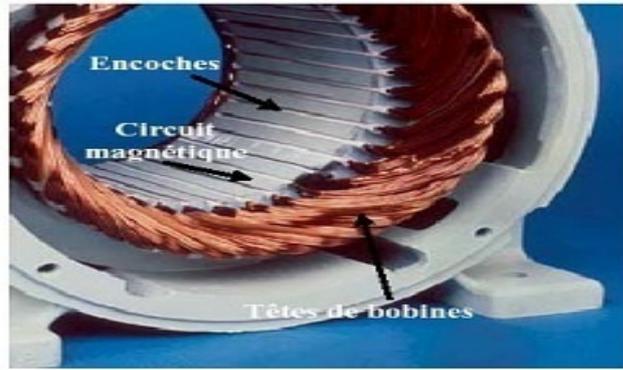


Figure 3 : Vue schématique du stator à 4 pôles (circuit magnétique, conducteurs actifs et têtes de bobines)

Le stator d'une machine asynchrone comporte une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique avec les terminaux des bobinages statoriques. Ceci permet de choisir le type de couplage étoile ou triangle.

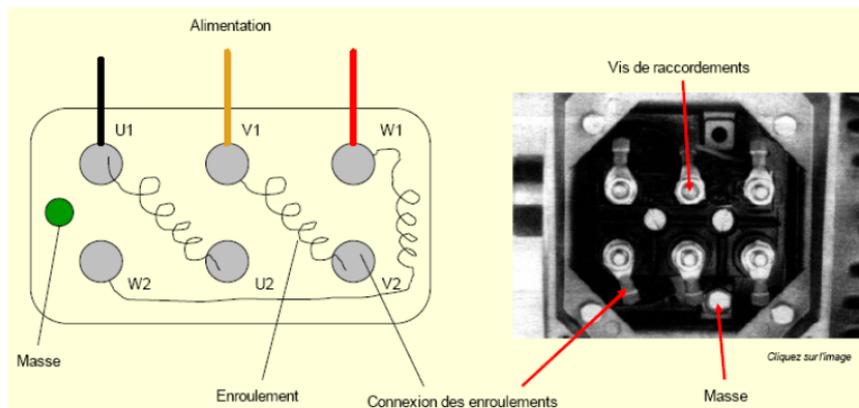


Figure 4 : La boîte à bornes d'une machine asynchrone triphasée

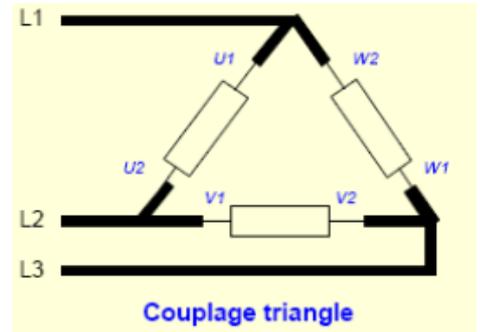
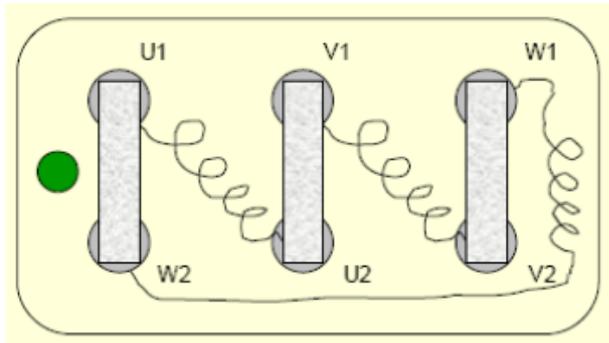
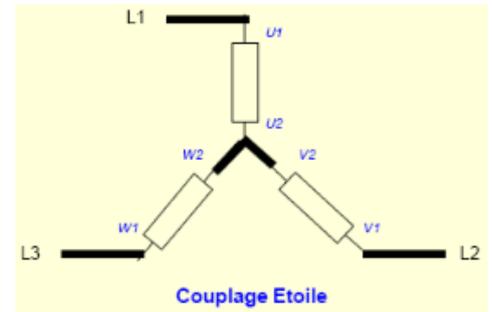
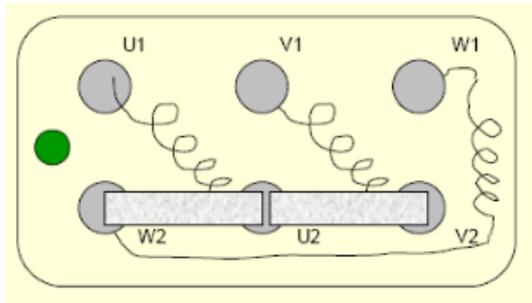


Figure 5 : Façon de couplage étoile et triangle dans la boîte à borne d'une machine asynchrone triphasée

II.2. Rotor

Le rotor, monté sur l'arbre, se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs ou de bobinages. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor :

- Rotor à cage d'écureuil.
- Rotor bobiné (à bagues).

II.2.1. Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de barres conductrices régulièrement réparties dans les encoches du circuit magnétique rotorique. Ces barres sont court-circuitées aux extrémités par des anneaux pour former un circuit fermé permettant la circulation des courants rotoriques induits.

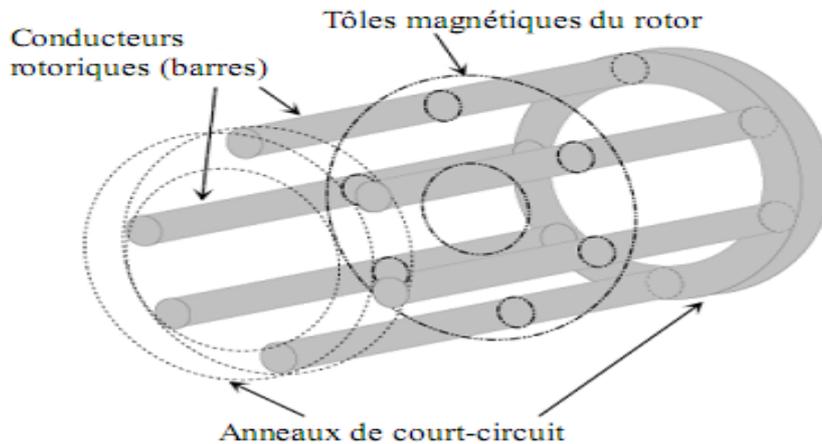


Figure 6 : Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

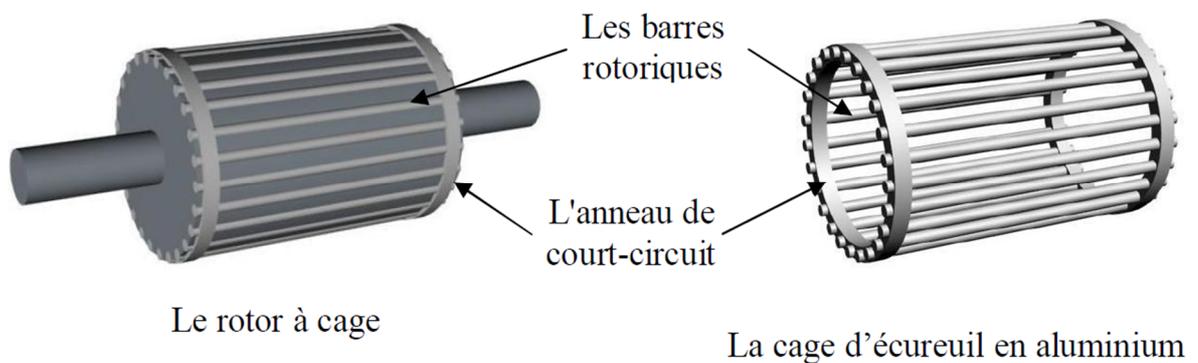


Figure 7 : Rotor à cage d'une machine asynchrone.

Les barres ou bien les conducteurs de la cage d'écureuil sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préfabriquées et insérées dans les tôles du rotor.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).



Figure 8 : Photo réelle d'un moteur asynchrone.

II.2.1. Rotor bobiné (à bagues)

Les rotors bobinés sont construits de même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.

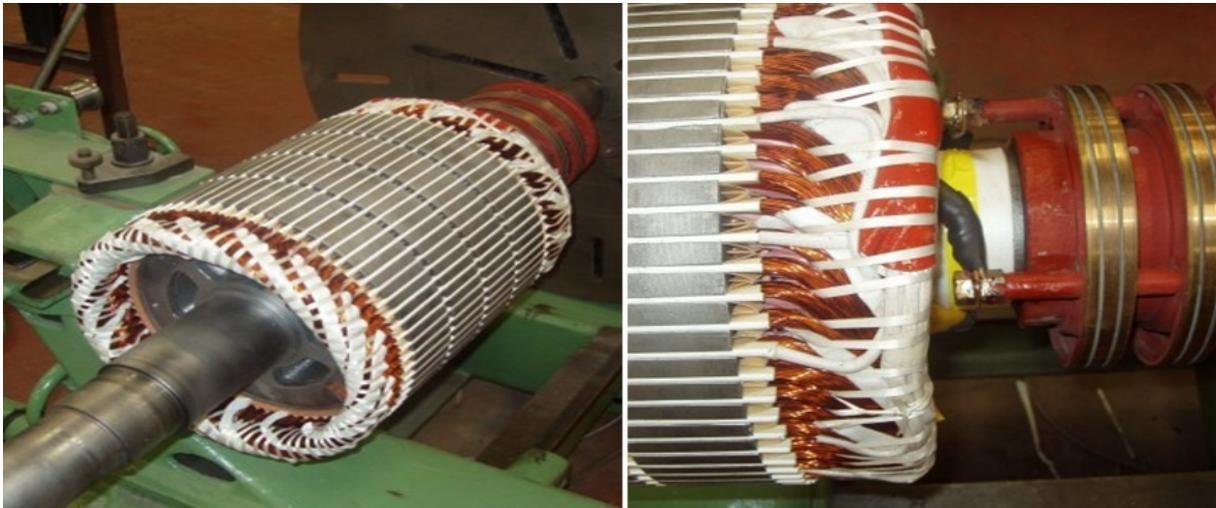


Figure 9 : Rotor bobiné d'une machine asynchrone.

III. LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE

Dans une machine asynchrone triphasée, Il y a trois bobines identiques placées à 120° (décalage spatiale de 120° entre eux) sur le stator et alimentées par trois tensions alternatives. On obtient un champ tournant à la vitesse angulaire de synchronisme Ω_s avec :

$$\Omega_s [rd/s] = \frac{\omega}{p} \quad (1)$$

où : ω la pulsation des courants d'alimentation.

p le nombre de paires de pôles.

Les conducteurs du rotor, balayés par le champ tournant d'entrefer, sont le siège de f.é.m. induites. Le rotor étant en court-circuit, ces f.é.m. produisent des courants induits. Ces courants placés dans le champ tournant sont soumis à des forces électromagnétiques. Ces forces produisent un couple qui fait tourner le rotor d'une vitesse angulaire Ω_r dans le même sens que le champ. Dans les machines asynchrones, on a toujours : $\Omega_r < \Omega_s$

Si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme, le flux à travers le rotor ne variait pas, donc il n'y aura plus de courants ni de couple.

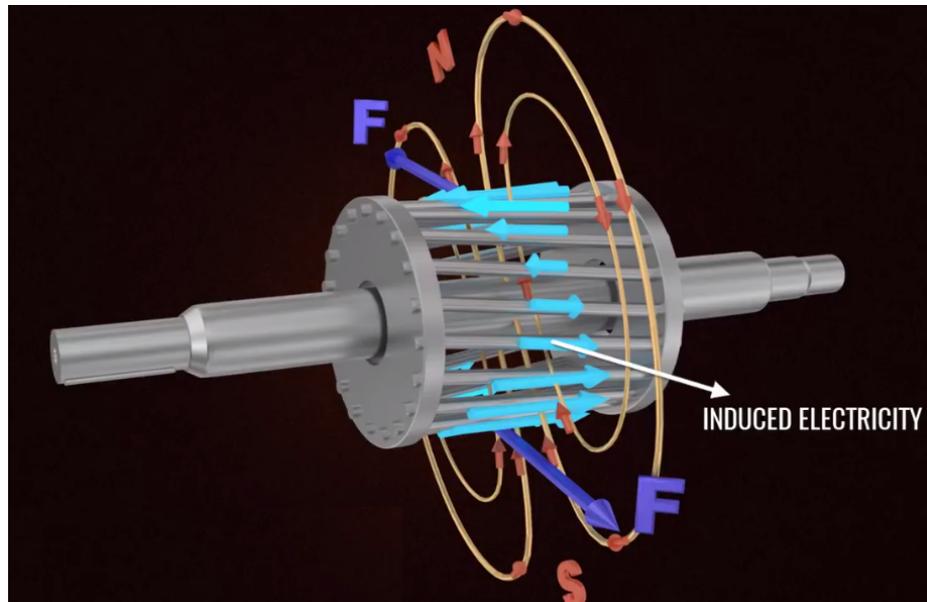


Figure 10 : Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

IV. Glissement

Par définition, le glissement d'un moteur asynchrone est donné :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s} = 1 - \frac{\Omega_r}{\Omega_s} = 1 - \frac{N_r}{N_s} \quad (2)$$

D'où :

$$\Omega_r = (1 - g)\Omega_s \quad (3)$$

Exemple : un moteur de 4 pôles tourne à une vitesse de 1440 tr/min $\Rightarrow g = 0.04$, on peut écrire aussi : $g = 4\%$

La fréquence et la pulsation des courants rotoriques sont données par :

$$f_R = g \cdot f_s \quad (4)$$

$$\omega_R = g \cdot \omega_s \quad (5)$$

Cas particuliers :

- Lorsque le moteur est à l'arrêt ou juste à l'instant de démarrage, on a : $N_r = 0 \Rightarrow g = 1$
- Lorsque le moteur fonctionne à vide (pas de charge mécanique), on a : $N_r \approx N_s \Rightarrow g = 0$

IV.1. La plaque signalétique

LS LEROY MOT. 3~ LS80 L T					
SOMER N° 734570 BJ 002 kg 9					
IP 55 Icl.F 40°C S1					
V	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 220	50	2780	0,75	0,86	3,3
Y 380					1,9
Δ 230	50	2800	0,75	0,83	3,3
Y 400					1,9
Δ 240	50	2825	0,75	0,80	3,3
Y 415					1,9

Mot. 3~ : moteur triphasé alternatif
 LS : série
 80 : hauteur d'axe
 L : symbole de carter
 T : indice d'imprégnation

N° : numéro de série moteur
 B : année de production
 J : mois de production
 002 : n° d'ordre dans la série
 kg : masse
 IP55 : indice de protection
 Icl.F : classe d'isolation F
 40°C : T. maxi de fonctionnement
 V : tension d'alimentation
 Hz : fréquence d'alimentation
 min⁻¹ : nbr de tours par minute
 kW : puissance nominale
 cos φ : facteur de puissance
 A : intensité nominale
 Δ : branchement triangle
 Y : branchement étoile

Figure 11: Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

- Ces indications correspondent au fonctionnement nominal du moteur. En fait, la puissance indiquée représente la puissance mécanique utile (0.75 kW).
- Le nombre de paires de pôles ou la vitesse de synchronisme peuvent être déterminés à partir de la vitesse de rotation nominale indiquée sur la plaque signalétique. Pour cet exemple, la vitesse de synchronisme est 3000 tr/min qui correspond à $p = 1$.
- Sur la plaque signalétique, la tension la plus faible représente la tension nominale aux bornes d'un enroulement statorique.
- Le type de couplage (étoile ou triangle) dépend de la tension du réseau triphasé disponible.
- Les tensions affichées sur la plaque signalétique sont des tensions entre lignes.
- Dans l'exemple de la Figure 9, si le réseau est de 230 V entre phases, le couplage doit être en triangle. Mais si le réseau est de 400 V entre phase le couplage doit être en étoile.
- Les intensités des courants affichés sur la plaque signalétique correspondent aux courants de ligne suivant le couplage choisit.

Exemple :

Indiquer dans le tableau ci-dessous le couplage des enroulements du moteur si cela est possible

Tensions du moteur affichées sur la plaque signalétique (toujours entre lignes)		Tensions du réseau d'alimentation (toujours entre lignes)		
Triangle	Etoile	220	380	660
127	220			
220	380			
380	660			

Conclusion :

- Si la tension composée du réseau = tension triangle du moteur \Rightarrow le moteur doit être couplé en triangle.
- Si la tension composée du réseau = tension étoile du moteur \Rightarrow le moteur doit être couplé en étoile.
- Si la tension composée du réseau $>$ tension étoile du moteur \Rightarrow aucun couplage n'est possible car le moteur risquera une surtension.
- Si la tension composée du réseau $<$ tension triangle du moteur \Rightarrow aucun couplage n'est possible car le moteur risquera une sous-tension.

V. Bilan des puissances

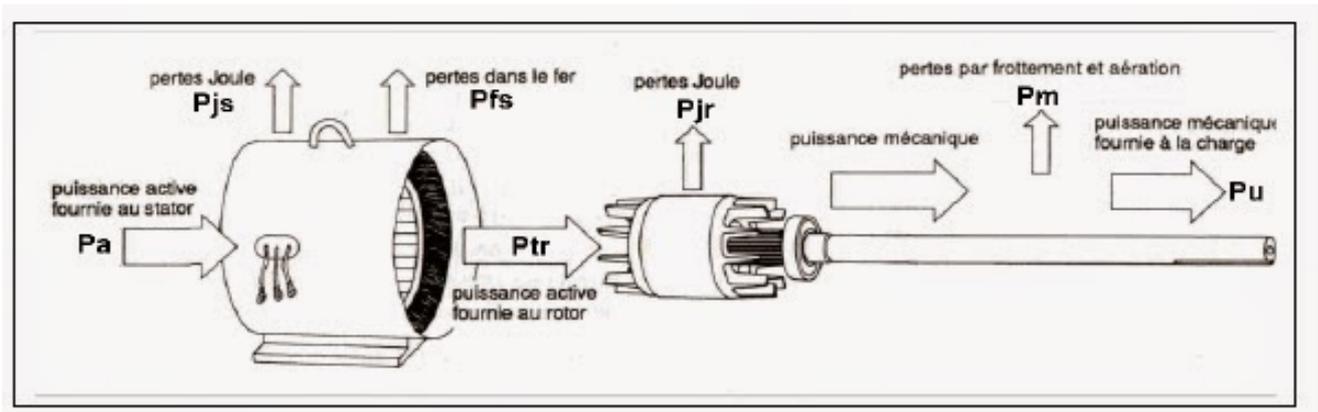


Figure 12 : Bilan de puissance d'un moteur asynchrone triphasé

V.1. Puissance absorbée (P_a)

C'est une puissance électrique active : $P_a = \sqrt{3}.U.I \cos \varphi$. Elle est fournie par le réseau électrique vers le stator du moteur asynchrone qui est le siège de deux types de pertes : *Pertes Joule* et *Pertes fer*.

V.2. Puissance transmise (P_{tr})

C'est une puissance transmise au rotor, elle est appelée aussi « **Puissance Electromagnétique (P_e)** ». Elle est donnée par :

$$P_{tr} = P_e = (P_a - p_{Js} - p_{fs})$$

V.3. Puissance mécanique (P_m)

C'est la puissance disponible sur le rotor :

$$P_m = (P_{tr} - p_{jR}), \text{ on démontre aussi que : } P_m = (1 - g).P_{tr}$$

V.4. Puissance utile (P_u)

C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur :

$$P_u = (P_m - p_m) = C_u.\Omega_r$$

V.5. Le couple électromagnétique (C_e)

Il est donné par : $C_e = \frac{P_e}{\Omega_s} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$, Il est égal aussi à : $C_e = \frac{P_m}{\Omega_r}$

Avec : Ω_s en [rd/s] est vitesse angulaire de synchronisme (du chan tournant)

Ω_r en [rd/s] est vitesse angulaire du rotor

Selon le bilan des puissances, on peut écrire :

$$p_{jR} = (P_{tr} - P_m) = (C_e.\Omega_s - C_e.\Omega_r) = C_e(\Omega_s - \Omega_r) = C_e.g.\Omega_s = g.P_{tr}$$

V.6. Les différentes pertes

a) Pertes Joule au Stator (p_{js})

On prend r_s la résistance d'un enroulement statorique et I le courant de ligne (courant composé), on peut écrire :

- Si le moteur est couplé en étoile : $p_{Js} = 3.r_s.I^2$
- Si le moteur est couplé en triangle : $p_{Js} = r_s.I^2$

Lorsqu'on prend R_s la résistance équivalente mesurée entre deux phases de stator, quel que soit le couplage des enroulements statoriques, les pertes Joules sont données par :

$$p_{Js} = \frac{3}{2}.R_s.I^2$$

Avec : $R_s = 2.r_s$ (si le couplage est étoile) et $R_s = 2/3.r_s$ (si le couplage est triangle).

b) Pertes Fer au Stator (p_{fs})

Ces pertes ne dépendent que de la tension et de la fréquence du réseau. Elles sont considérées toujours constantes.

c) Pertes fer au rotor (p_{fR})

Ces pertes sont négligeables car le rotor est court-circuité. $p_{fR} = 0$

d) Pertes Joule au rotor (p_{jR})

Théoriquement, ces pertes sont données par l'équation suivante :

$$p_{jR} = 3.R_r.I_r^2$$

Avec R_r est la résistance d'un enroulement rotorique et I_r est le courant traversant cet enroulement.

Cependant, le rotor d'un moteur asynchrone est court-circuité et souvent inaccessible donc, on ne peut pas mesurer directement ces pertes Joule. Mais on peut les calculées par l'équation suivante :

$$p_{jR} = g.P_{tr}$$

e) Pertes mécaniques (p_m)

Elles sont dues aux organes de fixation (roulement) ainsi que le ventilateur. Généralement, on les suppose constantes quelque soit le fonctionnement.

$$p_m = (P_m - P_u)$$

Généralement, les pertes mécaniques et les pertes fer au stator sont toujours constantes. Donc, on définit **les pertes collectives (p_{col})** comme suit :

$$p_{col} = (p_m - p_{fs})$$

On définit alors, le couple de pertes qui est constant quel que soit la charge : $C_p = \frac{p_{col}}{\Omega_r}$

VI. Le rendement (η)

- L'expression exacte du rendement est défini comme suit :

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

- Au voisinage du fonctionnement nominale, et si on peut négliger les pertes : p_{fs} , p_{js} et p_m , on peut écrire : $P_a \approx P_{tr}$ et $P_m \approx P_u$. En conséquence, on obtient l'expression approchée du rendement max :

$$\eta_{\max} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_m}{P_{tr}} = \frac{(1-g) \cdot P_{tr}}{P_{tr}} \Rightarrow \eta_{\max} = (1-g)$$

VII. Fonctionnement et caractéristiques**VII.1. Fonctionnement à vide**

A vide, le moteur asynchrone n'entraîne pas une charge mécanique $\Rightarrow (P_u = 0)$

↳ Le moteur tourne presque à la vitesse de synchronisme ($N_r = N_s$)

↳ Le glissement est nul ($g = 0$)

↳ Les pertes Joule rotoriques sont nulles ($p_{jR} = 0$)

Noter bien qu'à vide, la puissance active (P) absorbée est petite tandis que celle réactive (Q) est forte. Ce qui donne un facteur de puissance très faible (< 0.2), mais le courant statorique absorbé représente approximativement 50% du courant nominale. On peut dire que le moteur à vide absorbe un courant magnétisant qui sert à produire le champ magnétique.

VII.2. Fonctionnement en charge

Dans ce cas, le moteur absorbe une puissance électrique active qui dépend de la charge mécanique appliquée sur l'arbre du moteur.

La figure ci-dessous montre l'évolution des différentes grandeurs caractéristiques de la machines asynchrone en fonction de la puissance utile.

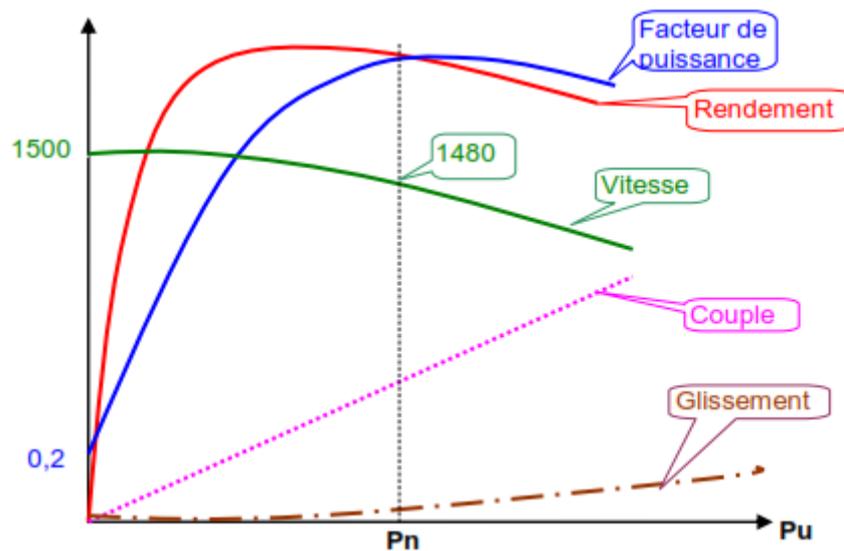


Figure 13 : Les caractéristiques en charge

a) Le Facteur de puissance

A vide, il est d'environ 0.2. Sa valeur augmente en fonction de la charge jusqu'à la charge nominale où il atteint sa valeur max. Puis, il diminue légèrement pour les surcharges.

b) Le rendement

Le rendement est bon à partir de la demi-charge. Il passe par sa valeur maximale au voisinage du fonctionnement nominal, puis il diminue pour les surcharges.

c) La vitesse et le glissement

Elle décroît légèrement quand la charge augmente. La variation de la vitesse est d'ordre de 5% entre la marche à vide est celui en charge. En conséquence, le glissement augmente légèrement en fonction de la charge.

VII.2. Caractéristique mécanique

La figure ci-dessous représente l'allure du couple utile en fonction de la vitesse de rotation du rotor. On peut aussi le représenter en fonction du glissement. Cette courbe ($Cu = f(Nr)$ ou bien $Cu = f(g)$) est appelée *caractéristique mécanique* d'un moteur asynchrone.

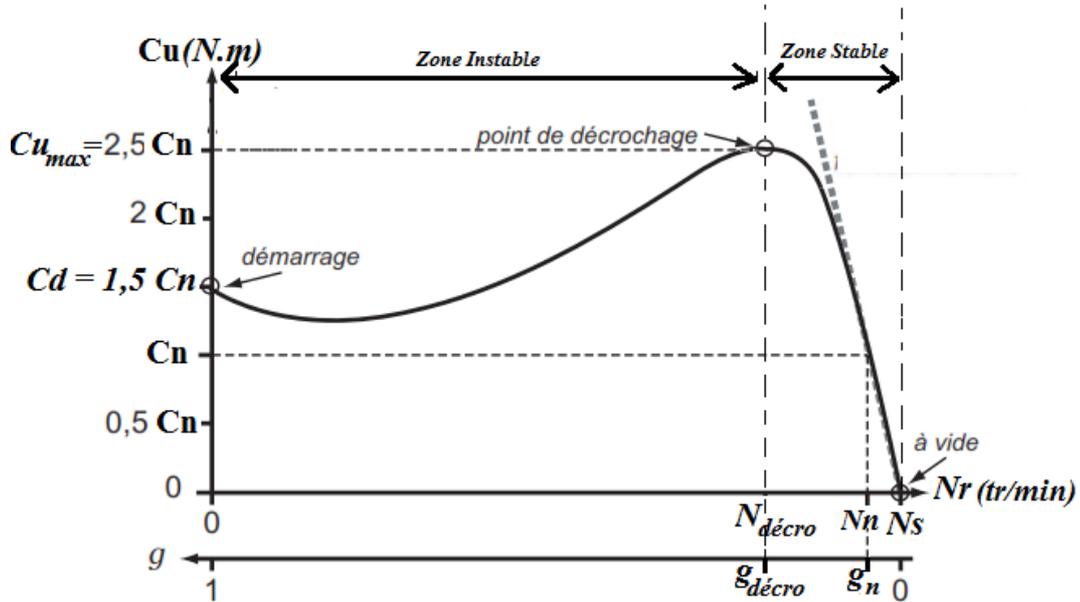


Figure 14 : La caractéristique mécanique

La caractéristique mécanique est divisée en deux parties :

- La zone de fonctionnement **instable** où la vitesse appartient à l'intervalle $[0 \rightarrow N_{décro}]$. L'allure du couple prend une forme d'hyperbole. On remarque qu'au démarrage, le moteur asynchrone développe un couple important qui lui permet de démarrer même en charge.
- La zone de fonctionnement **stable (utile)** où la vitesse appartient à l'intervalle $[N_{décro} \rightarrow N_s]$. L'allure du couple est presque linéaire, on peut la modéliser par l'équation d'une droite comme suit :

$$Cu = a.Nr + b$$

Pour calculer les coefficients « a » et « b », on a besoin de deux points de fonctionnement.

Remarque 1 : si le couple est tracé en fonction du glissement, la zone stable est modélisée par

l'équation suivante (avec k est une constante):

$$Cu = k.g$$

On peut dire qu'au voisinage du fonctionnement nominal (Zone stable), le couple utile est proportionnel au glissement.

Remarque 2 : Dans la zone stable, si la charge mécanique (couple résistant) augmente \Rightarrow la vitesse de rotation diminue jusqu'à la valeur de décrochage ($N_{décro}$) qui correspond au couple maximal \Rightarrow le moteur ne peut entrainer la charge mécanique, il cale. Typiquement, $N_{décro} \approx 0,8.N_s$

Remarque 3 : les mêmes résultats et remarques sont valables lorsqu'on parle du couple électromagnétique en fonction de la vitesse ($Ce = f(Nr)$).

VII.3. Point de fonctionnement

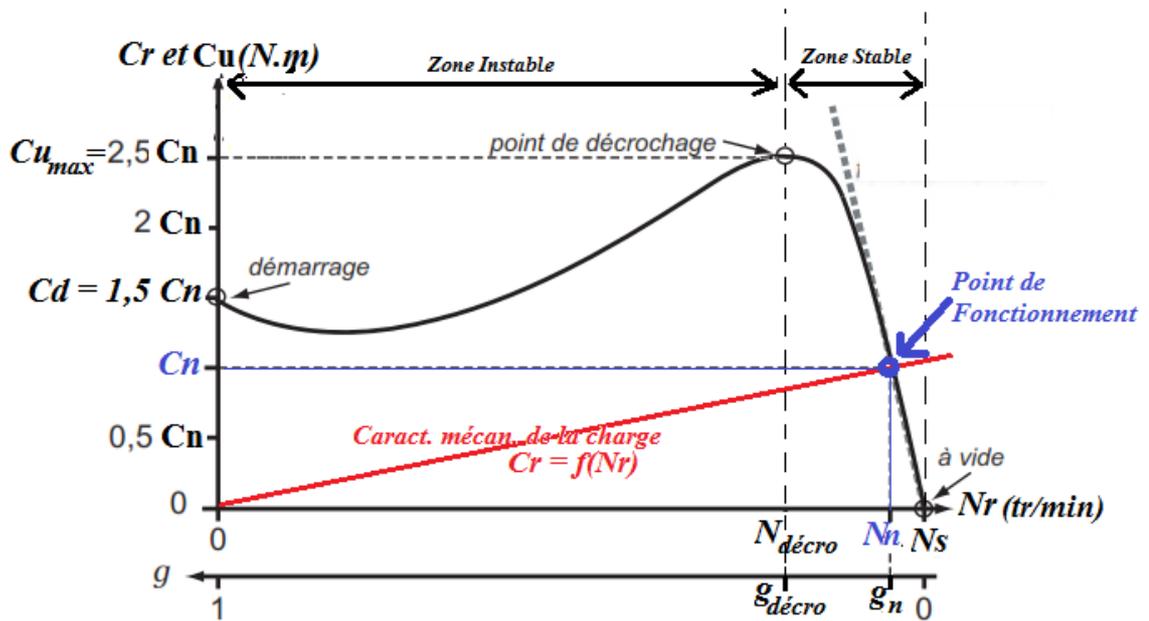


Figure 15 : Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement d'un moteur asynchrone est le point d'intersection entre les courbes des caractéristiques mécaniques du moteur ($Cu = f(Nr)$) et de la charge entraînée ($Cr = f(Nr)$).

Les coordonnées du point de fonctionnement ($P(Nr, Cu)$) se déterminent analytiquement comme suit :

On a les deux équations des deux caractéristiques mécaniques :

$$Cu = a.Nr + b \quad \text{et} \quad Cr = k.Nr$$

En régime permanent, on a toujours $Cu = Cr$ ce qui donne : $a.Nr + b = k.Nr$

En résolvant cette équation, on obtient les coordonnées du point de fonctionnement.

Remarque :

Il y a plusieurs types de charge pour le moteur asynchrone. Chaque type a une équation mécanique différente. Voilà quelques exemples :

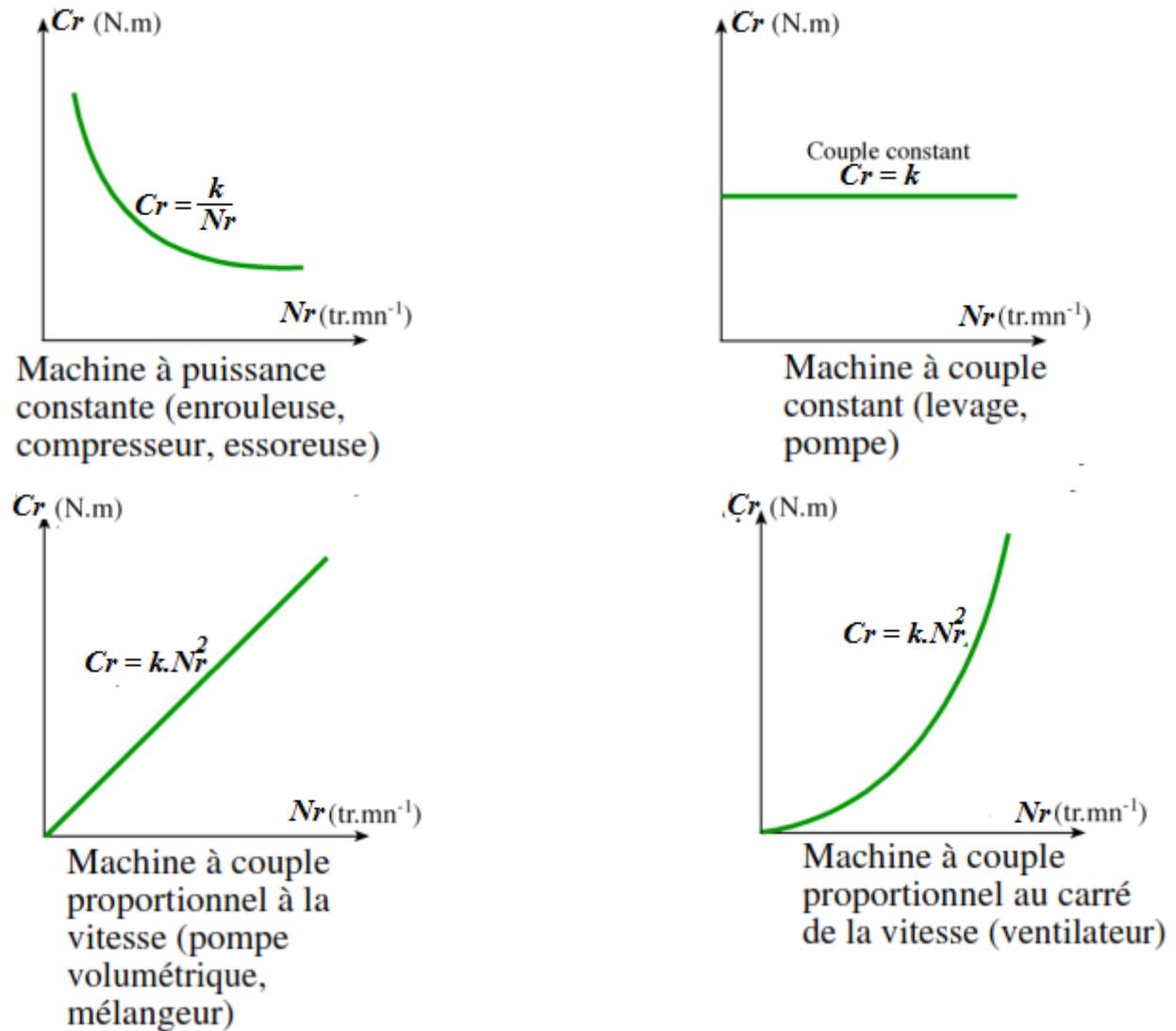


Figure 16 : Caractéristiques mécaniques de quelques charges

VIII. Méthodes de démarrage des moteurs asynchrones :

Il existe cinq méthodes de démarrage pour les moteurs asynchrones triphasés.

a) Action sur le circuit primaire (stator)

On peut réaliser le démarrage par :

- Couplage étoile-triangle.
- L'insertion puis l'élimination des résistances statoriques
- Autotransformateurs.

Inconvénient :

- Le couple de démarrage qui est proportionnel au carré de la tension est réduit dans le même rapport.

b) Action sur le circuit secondaire (rotor)

On peut réaliser le démarrage par :

- L'insertion puis l'élimination des résistances rotoriques dans le cas d'un moteur à rotor bobiné
- Dans le cas d'un moteur à cage, on utilise des rotors à cage multiples ou à encoches profonds.

L'augmentation de la résistance rotorique se traduit par :

- Une augmentation du couple de démarrage.
- Une diminution du courant de démarrage.