

ELE 1409: ÉLECTRICITÉ DU BÂTIMENT

COURS 6: MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS ET VARIATEURS DE VITESSE

Liens vidéo

Première partie: <https://www.loom.com/share/ee0600e584e44559a002286c6610c8f1?sid=c3b7093c-9ade-4730-8e42-57f24a88a652>

Deuxième partie: <https://www.loom.com/share/dd6f462f01c943069f666bd4c9257406?sid=464d603b-8157-4e3d-858a-bd64734b0eb3>



Objectifs du cours 6

À l'issue de ce sixième cours, l'étudiant(e) sera en mesure de :

- ☐ Interpréter les **principales caractéristiques** d'un **M**oteur **AS**ynchrone (**MAS**).
- ☐ Connaître le **principe de fonctionnement** d'un **MAS**.
- ☐ Déterminer le **rendement** d'un **MAS**.
- ☐ Connaître le **principe de variation de la vitesse** des **MAS**.

Sommaire



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE

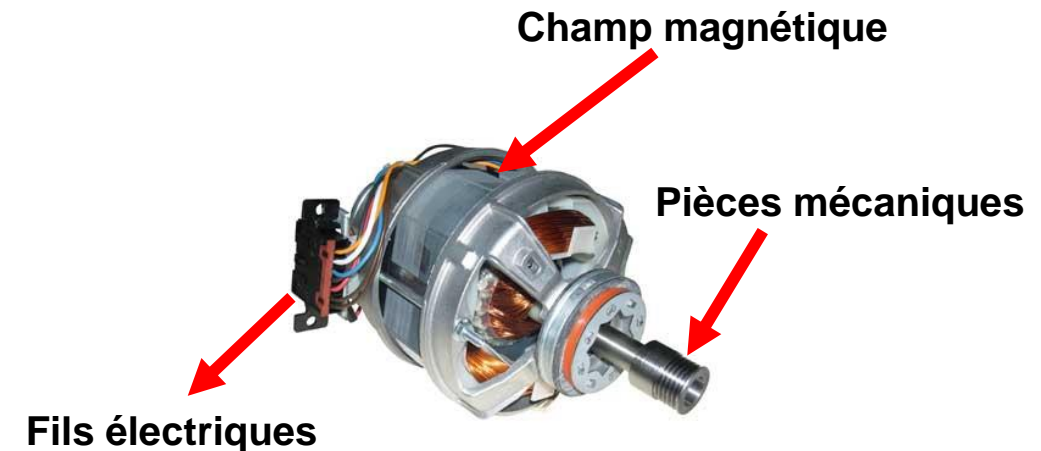
- ☐ Généralités
- ☐ Caractérisation d'un MAS
- ☐ MAS en fonctionnement
- ☐ Variation de la vitesse d'un MAS
- ☐ Conclusion

Généralités: *Quelques définitions*

- ❑ Une **machine** est tout mécanisme prêt à communiquer un mouvement ou à effectuer un travail.
- ❑ Les **machines électriques** sont des dispositifs fondés sur l'**électromagnétisme**, permettant une conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa.
- ❑ L'**électromagnétisme** est la partie de la physique qui étudie les interactions entre courants électriques et champs magnétiques.

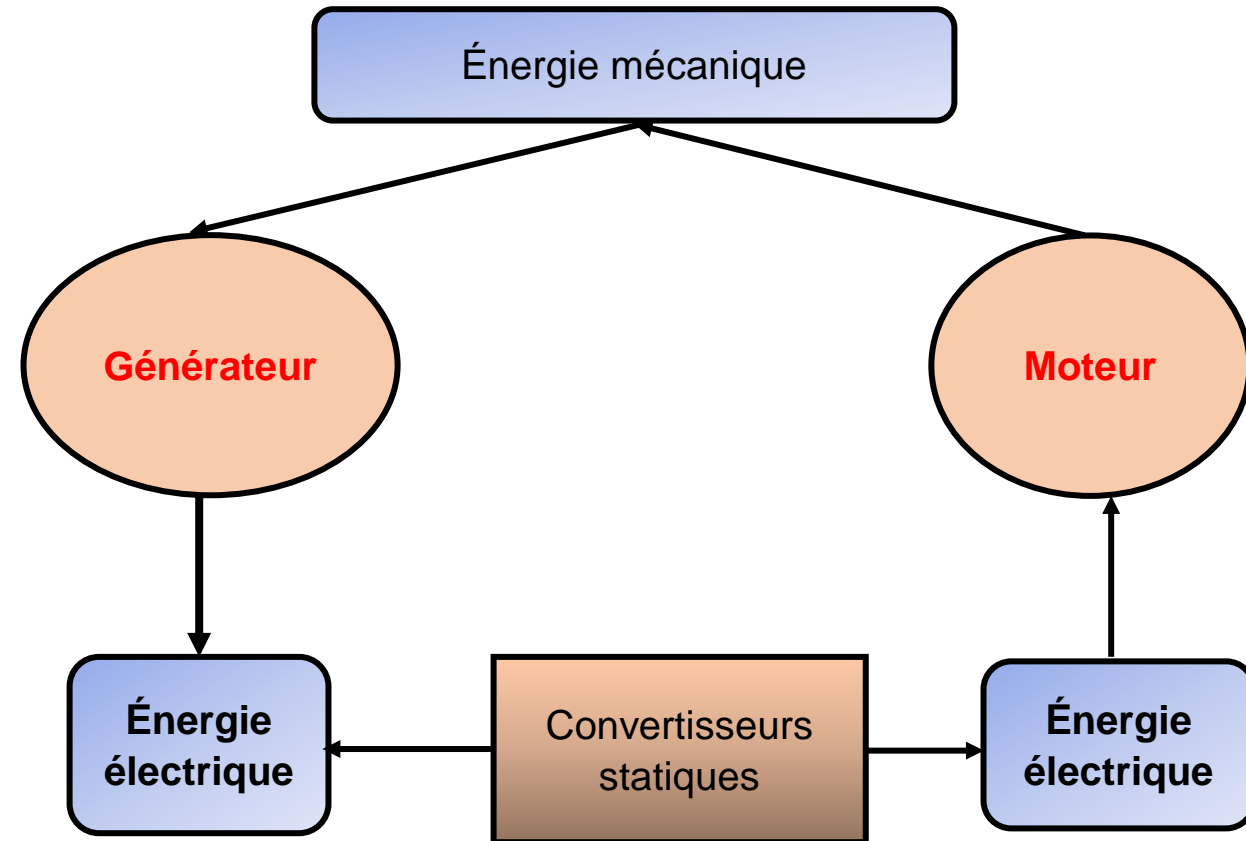
Remarque, une machine électrique comportera les éléments suivants:

- ✓ Des **aimants** pour le **champ magnétique**;
- ✓ Des **pièces mécaniques** pour le mouvement ou la fixation.
- ✓ Des **fils électriques**.



Généralités: *Classification des machines électriques*

- ❑ Les **générateurs** : transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ❑ Les **moteurs**: transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.
- ❑ Les **convertisseurs statiques** : transformation de l'énergie électrique en énergie électrique.

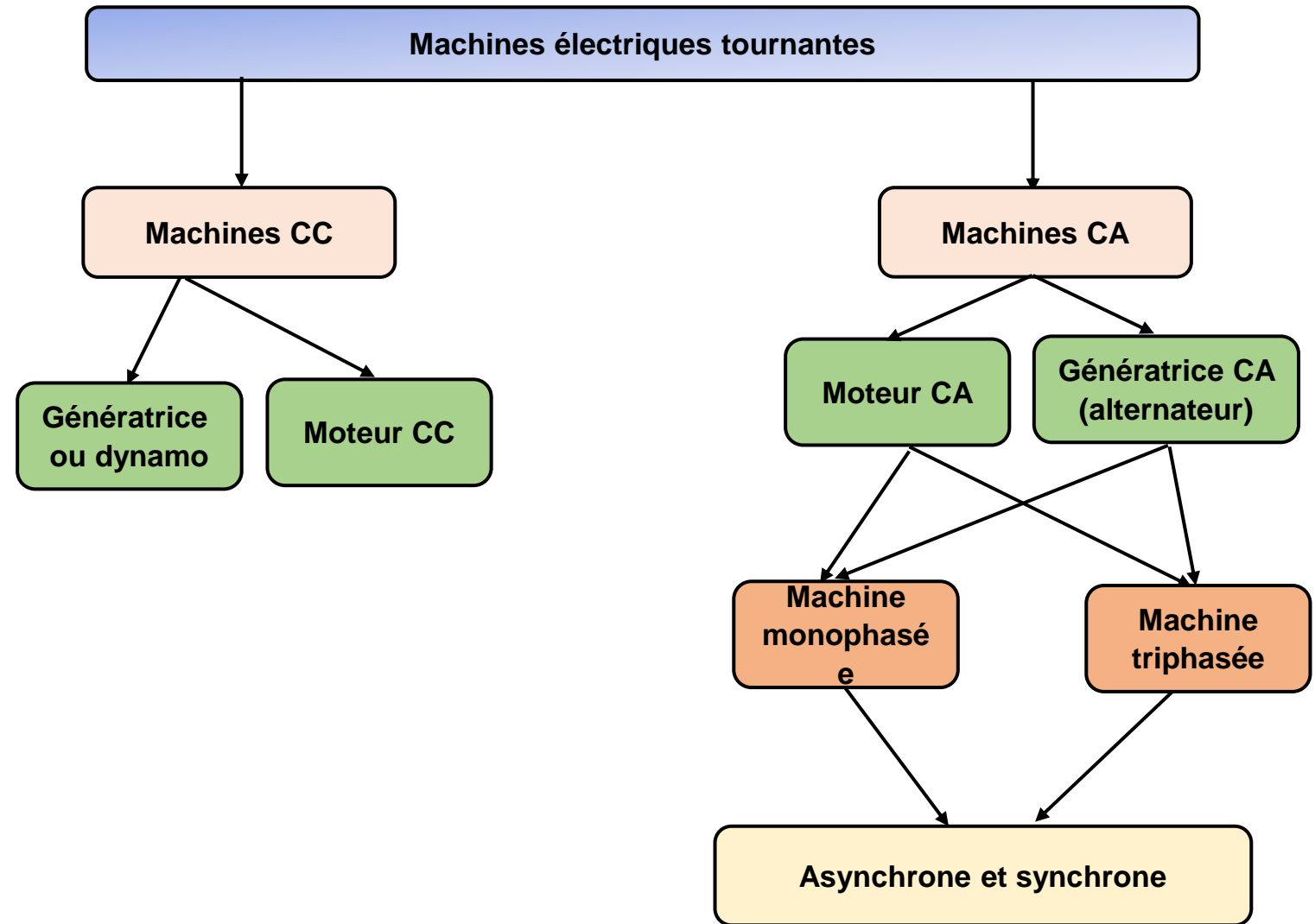


Généralités: *Classification des machines électriques tournantes*

Critères de classification

- ❑ Nature du courant électrique: **alternative** ou **continue**
- ❑ Sources alternatives: **monophasée** ou **triphasée**
- ❑ Type de transformation: **mécano-électrique (générateur)** ou **électromécanique (moteur)**.

Dans le cadre de ce cours, on traitera du **moteur asynchrone triphasé** que nous abrègerons **MAS**.



Description d'un MAS: *avantages et principales parties*

- ❑ Un **MAS** aussi appelé **moteur à induction** est une machine tournante convertissant une puissance électrique alternative en une puissance mécanique.
- ❑ Les MAS sont les machines les plus utilisées dans les installations industrielles ceci à cause:
 - de leur **coût inférieur** à celui des autres machines
 - et leur **robustesse**
 - du fait qu'ils **nécessitent peu d'entretien**
 - un fort **couple de démarrage**.

Comme toutes les machines tournantes, le MAS comporte trois principales parties :

- Le **stator** qui est la partie fixe
- Le **rotor** qui est la partie tournante de la machine.
- L'**entrefer** qui est l'espace séparant le rotor du stator.

Description d'un MAS: *Stator d'un MAS*

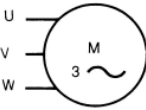
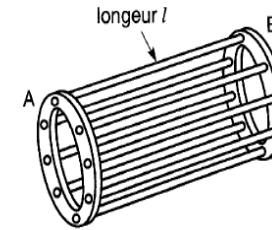
Il comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide. Des trous constituant des **encoches** permettent de loger un **bobinage triphasé de conducteurs**. Les courants triphasés parcourant les bobines identiques du stator forment un **système triphasé équilibré**.



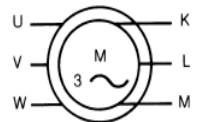
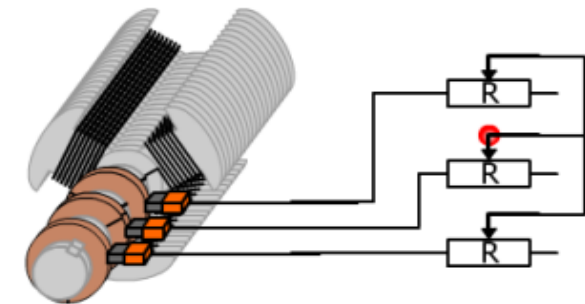
Description d'un MAS: *rotor d'un MAS*

- ❑ On différencie les MAS par le type de rotor utilisé et on distinguera : les rotors à **cage d'écureuil** et les rotors **bobinés**.
- ❑ Les enroulements des moteurs à **cage d'écureuil** sont constitués de barres de cuivre nues introduites dans les encoches. Il s'agit des moteurs de **petite puissance**, mais de **grandes vitesses**.
- ❑ Les **rotors bobinés** ont un bobinage triphasé semblable à celui du stator, les enroulements triphasés sont raccordés en **étoile** avec les extrémités libres reliées à une bague offrant ainsi la possibilité d'ajouter en série une résistance.

Rotor à cage d'écureuil



Rotor bobiné



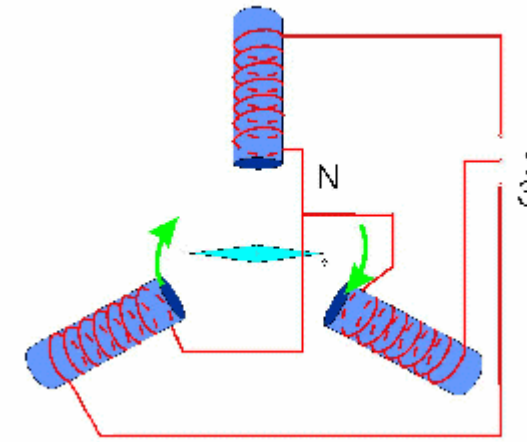
Source: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQqoWgEj27LUD1rcqktI7R3LIAV-q3obujLrtY0QJD6LR0yf0FgIhiLQSmZEH2B0Mp07ZI&usqp=CAU>

MAS en fonctionnement: *le champ magnétique tournant*

❑ Lorsqu'on alimente trois bobines par un système de tensions triphasées, alors chacune des bobines produit son champ magnétique. Au centre des trois bobines, le champ résultant est **tournant**.

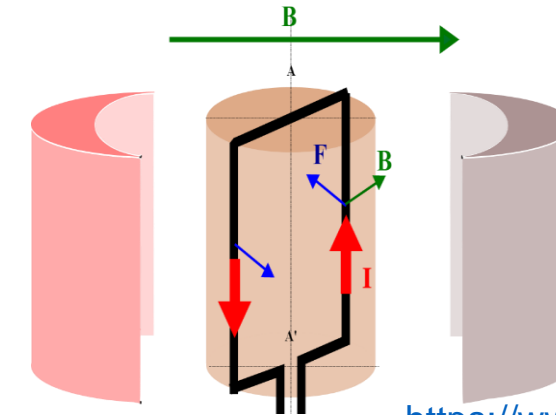
❑ Le rotor du MAS n'est pas raccordé au réseau électrique. *Le champ magnétique tournant généré par les bobines statoriques induit des courants dans les conducteurs du rotor qui subissent ainsi la force de Laplace* définie comme suit :

$$\vec{F} = \vec{I}L \wedge \vec{B}$$



Source :

http://www.elharzli.com/images/ChampTournant/Champ%20tournat_html_meeda7f5.gif

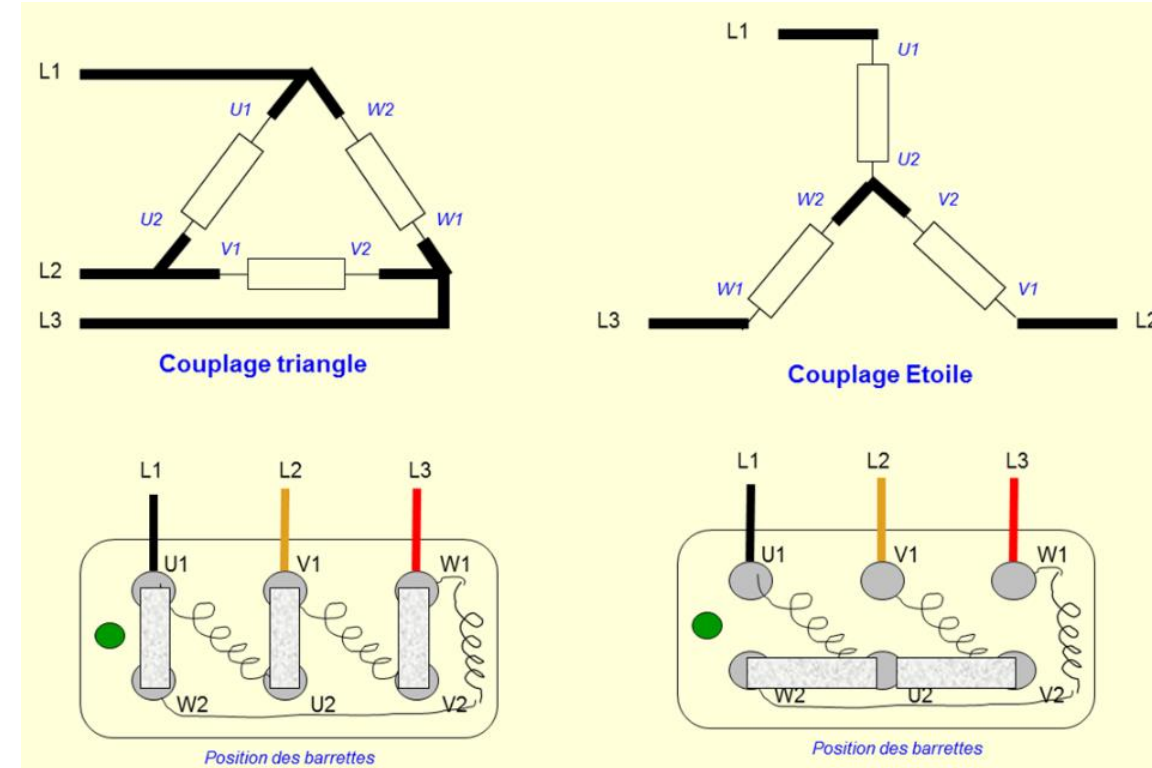


Source :

https://www.enib.fr/~kerhoas/MC_C/illustrations/principe_mcc.svg

MAS en fonctionnement: *Couplages des enroulements du stator*

- ❑ Pour chaque moteur, les constructeurs définissent la **tension d'alimentation des enroulements statoriques** pour un fonctionnement adéquat.
- ❑ Rappelons que deux systèmes de tension sont mis en jeu dans une source triphasée : les **tensions de ligne** et les **tensions de phase**. Un réseau triphasé peut également être caractérisé comme suit : V_{ph}/V_L .
- ✓ Dans le **couplage étoile**, les enroulements sont alimentés par les **tensions de phase**.
- ✓ Dans le **couplage triangle**, les enroulements sont alimentés par les **tensions de ligne**.



Source

http://lefrancoisjj.fr/BTS_ET/Lemoteurasynchrone/Le%20moteur%20asynchronehelpoc/lib/NouvelElement36.png

Exemple d'application 1 : La tension nominale aux bornes d'un enroulement d'un MAS est de 400 V.

1. Quel doit être le couplage de ce moteur sur un réseau triphasé 230 V/400 V.
2. Quel doit être le couplage de ce moteur sur un réseau triphasé 400 V/690 V.

Solution 1 : La tension nominale aux bornes d'un enroulement d'un MAS est de 400 V.

1. Couplage de ce moteur sur un réseau triphasé 230 V/400 V.

Chaque enroulement du moteur pour être correctement alimenté, doit être raccordé entre **deux lignes** dont le couplage approprié est un **triangle**.

2. Couplage de ce moteur sur un réseau triphasé 400 V/690 V.

Dans ce cas, les enroulements du moteur pour être correctement alimentés, doivent être soumis aux **tensions de phase**, dont le couplage approprié est **étoile**.

MAS en fonctionnement : *Vitesse du champ magnétique tournant*

❑ Le stator alimenté par un réseau à fréquence f , crée un champ magnétique tournant à la vitesse n_s appelé **vitesse de synchronisme** ou **vitesse synchrone**. Elle est liée à la fréquence f comme suit:

$$n_s = 2 \frac{f}{p} \quad ; \quad \begin{cases} f \text{ en Hz} \\ n_s \text{ en tr/s} \\ p: \text{ nombre de pôles du stator} \end{cases}$$

❑ Généralement, la vitesse est donnée est tr/min ou rpm ce qui donne alors :

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad ; \quad \begin{cases} f \text{ en Hz} \\ n_s \text{ en tr/min ou rpm} \\ p: \text{ nombre de pôles du stator} \end{cases}$$

Exemples de vitesse de synchronisme en fonction du nombre de pôles. En Amérique du Nord, la fréquence est **$f = 60 \text{ Hz}$** .

Nombres de pôles	Vitesse de synchronisme (tr/min)
$p = 2$	3600
$p = 4$	1800
$p = 6$	1200
$p = 8$	900
$p = 10$	720

MAS en fonctionnement: *Glissement du rotor*

- ❑ Le rotor **ne** tourne pas à la même vitesse que le champ magnétique tournant du fait de l'inertie et de la charge. On dit que le rotor **glisse** sur le champ magnétique.
- ❑ La **vitesse de glissement** n_g est la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor.

$$n_g = n_s - n$$

- ❑ Le **glissement** traduit la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor relativement à la vitesse de synchronisme; on le note s et on a :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \Rightarrow s = \frac{n_g}{n_s} \times 100$$

- ❑ À partir de la définition du glissement, on extrait la vitesse du rotor comme suit :

$$n = (1 - s)n_s$$

MAS en fonctionnement: *Glissement du rotor*

Exemple d'application 2: Calcul du glissement à partir de la plaque signalétique d'un MAS

La figure ci-contre représente la plaque signalétique d'un moteur LEESON 3/4 HP disponible au laboratoire A-236. **Calcul du glissement à pleine charge pour ce moteur.**

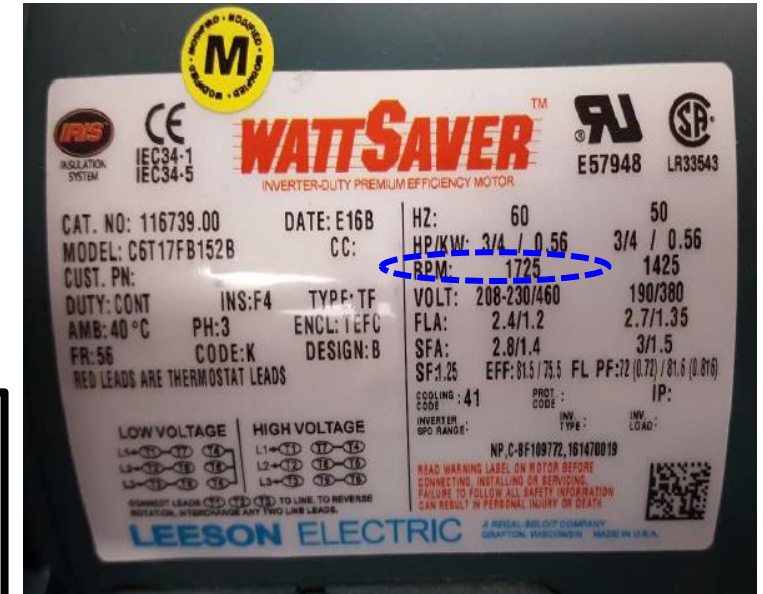
Solution 2 : Calcul du glissement à partir de la plaque signalétique d'un MAS

On identifie sur la plaque signalétique du moteur une vitesse nominale de $n = 1725 \text{ rpm}$ ainsi le nombre de pôles du MAS sera :

$$p < \frac{120 f}{n} = \frac{120 \times 60}{1725} = 4,17 \Rightarrow p = 4 \Rightarrow n_s = 1800 \text{ rpm}$$

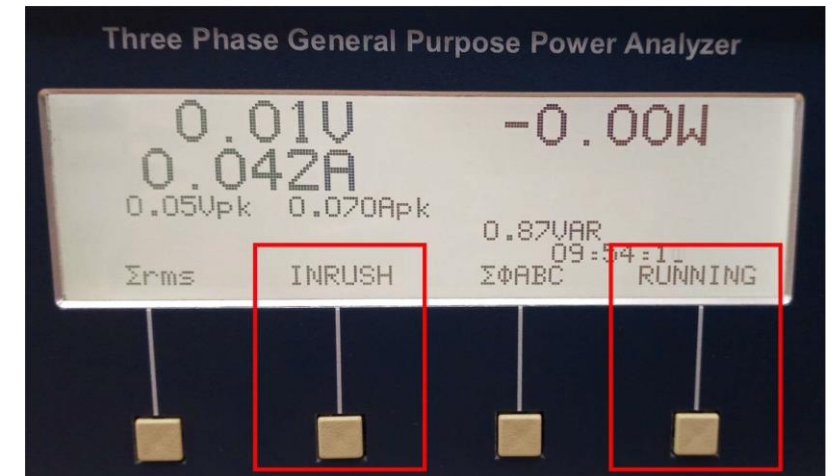
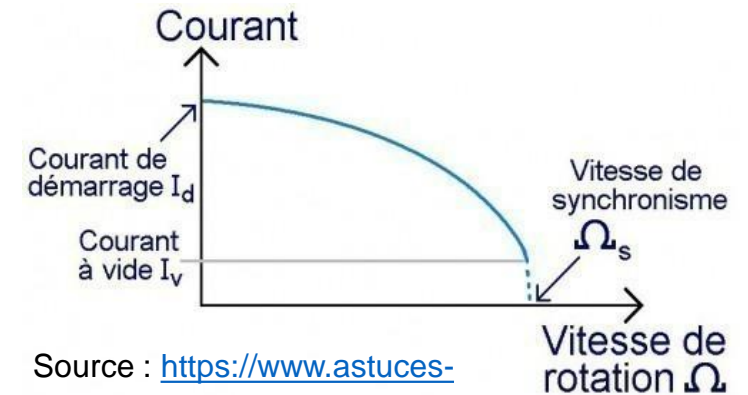
Ce qui donne alors :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 = \frac{1800 - 1725}{1800} \times 100 = 4,16 \%$$



MAS en fonctionnement: *MAS au démarrage*

- ❑ La phase de **démarrage** d'un MAS nécessite un **traitement particulier**, car le rotor est **immobile** et le champ magnétique extrêmement rapide induit des **courants importants dans les enroulements du rotor**.
- ❑ L'appel de courant (**inrush current**) au niveau du stator sera alors très important pouvant atteindre plus de 5 fois sa valeur nominale.
- ❑ Cette pointe de courant peut faire déclencher les dispositifs de protection ou alors détériorer l'installation existante. Pour éviter cela, on utilise les **variateurs de vitesse** pour contrôler les courants de ligne.

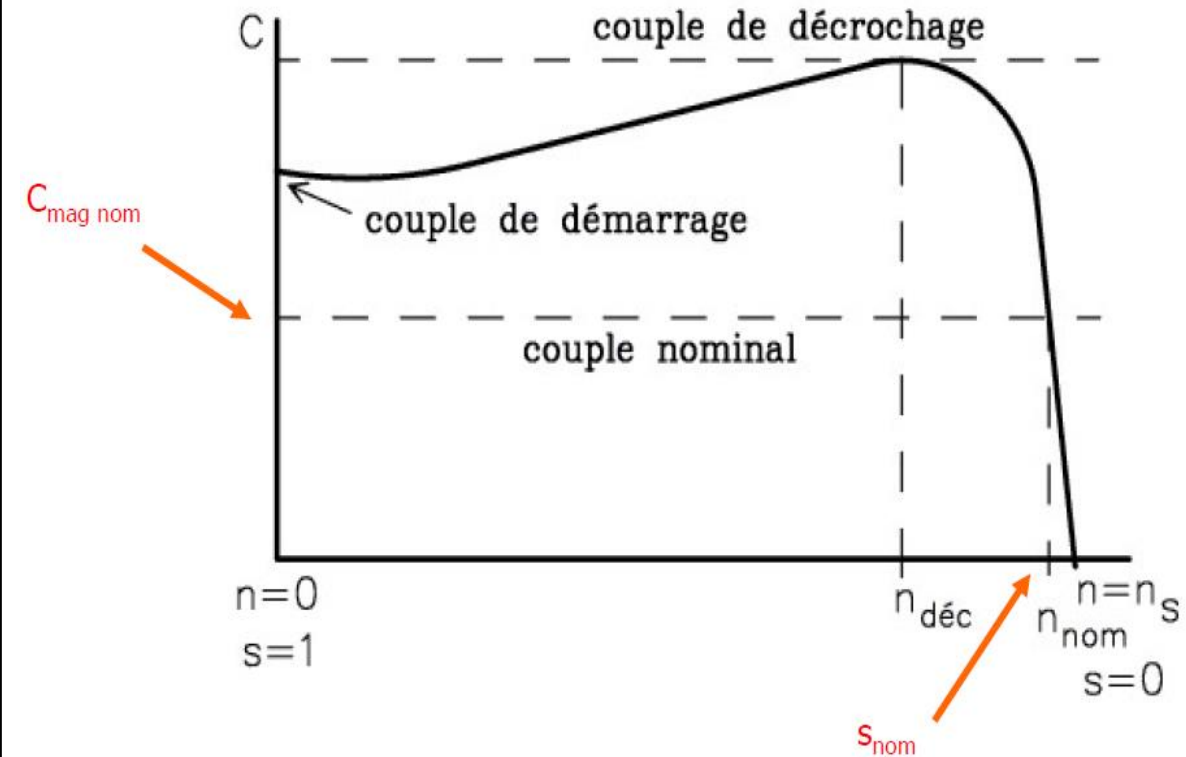


- ❑ **Glissement**: Le rotor n'entraîne aucune charge et donc sa vitesse est proche de celle du champ tournant: $n_0 \approx n_s \Rightarrow s \approx 0$
- ❑ **Facteur de puissance**: Le courant absorbé par le moteur sert uniquement à produire le champ magnétique tournant dans le **MAS**. Le MAS a ainsi un comportement globalement **réactif**; il aura un facteur de puissance **FP_0 très faible**. Il est de l'ordre de **20 %** pour les faibles puissances et **5 %** pour les grandes puissances.

MAS en fonctionnement: *Fonctionnement en charge*

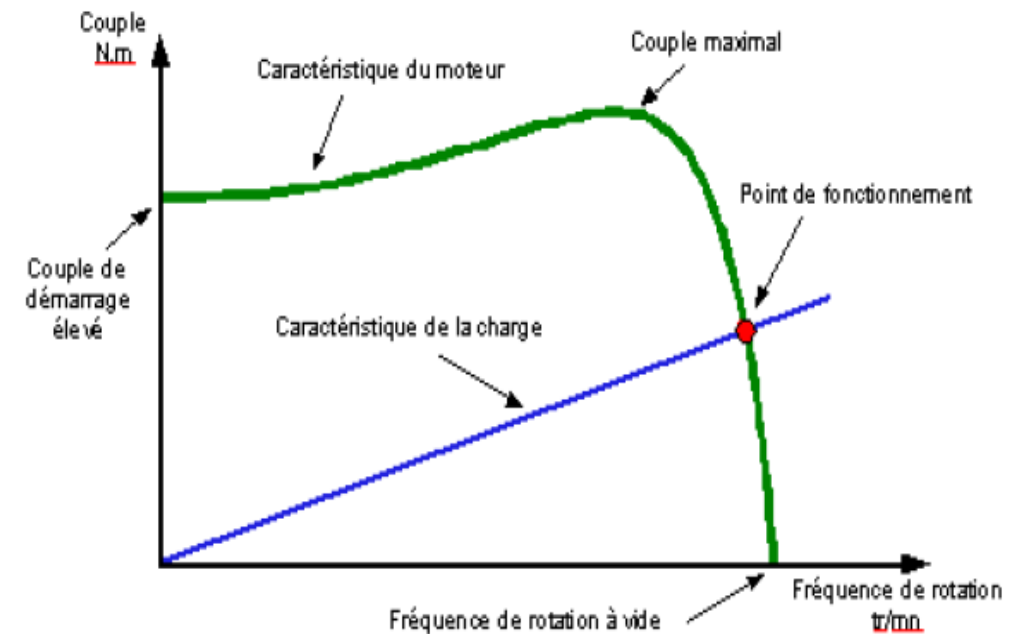
❑ **Glissement**: Lorsqu'on charge le MAS, celui-ci doit fournir un effort mécanique et le rotor va ralentir ce qui signifie que le **glissement augmente**. La **puissance active augmente également** tandis que la **puissance réactive ne varie pas beaucoup**, ce qui entraîne une **augmentation du FP**.

❑ **Caractéristique mécanique d'un MAS**: La puissance fournie par le MAS se caractérise par un **couple T** (aussi noté **C**) et une **vitesse (n)**.



❑ La **zone de fonctionnement** (zone où le moteur travaille après avoir démarré) est celle qui se situe dans les dans la région des valeurs hautes de **n** c'est-à-dire pour de faibles valeurs de glissement. En fonctionnement, on rapproche la caractéristique couple-vitesse à une droite soit : **$T(n) = an + b$**

❑ **Point de fonctionnement**: Les mécanismes entraînés par les moteurs ont des caractéristiques de couple résistant pouvant également varier en fonction de leur vitesse de rotation. Le ***point de fonctionnement se situe à l'intersection des deux caractéristiques.***



Source : http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/res/Pt_Fonct.png

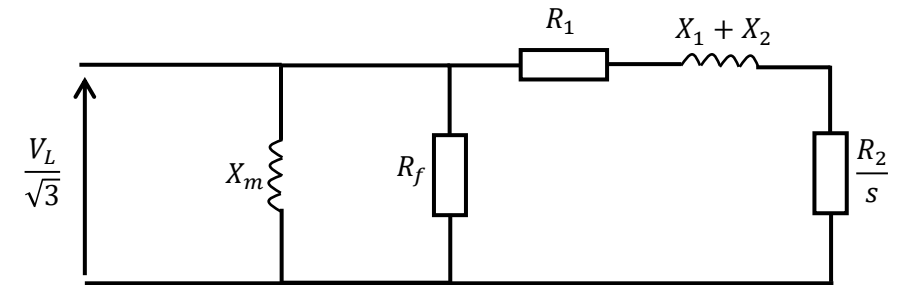
MAS en charge: *couple en fonction du glissement*

- Un **modèle électrique équivalent** simplifié d'un MAS sur une phase est montré ci-contre.

- À partir de la modélisation, le couple électromagnétique du MAS s'exprime comme suit:

$$T = \frac{K\phi s V_2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}$$

ϕ représente le flux résultant, et K une **constante de construction**. V_2 est la **tension induite** dans les enroulements rotoriques lorsqu'il est bloqué.



R_1 est la résistance des enroulements statoriques

R_2 est la résistance des enroulements rotoriques

X_1 est la réactance du stator

X_2 réactance du rotor.

X_m et R_f sont liés à l'entrefer du MAS.

MAS en charge: *couple en fonction du glissement*

- À partir de la modélisation, le couple électromagnétique du MAS s'exprime comme suit:

$$T = \frac{K\phi s V_2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}$$

ϕ représente le flux résultant, et K une **constante de construction**. V_2 est la **tension induite** dans les enroulements rotoriques lorsqu'il est bloqué

- Dans la zone de fonctionnement du moteur, on a de faibles valeurs de glissement et donc :

$$s^2 X_2^2 \ll R_2^2 \Rightarrow T \approx \frac{K\phi s V_2 R_2}{R_2^2} = \frac{K\phi s V_2}{R_2} \Rightarrow \mathbf{T \approx K's}$$

- Le **coefficient de proportionnalité K'** peut être déterminé à partir des **valeurs de couple et de glissement en régime nominal (données de la plaque signalétique)** si on approxime le couple électromagnétique au couple utile.

$$K' = \frac{T_n}{s_n}$$

$$P = T \times \Omega = \frac{n \times T}{9,55} ; \begin{cases} P \text{ en } W \\ n \text{ en rpm} \\ T \text{ en } N.m \\ \Omega \text{ en rad/s} \end{cases}$$

Exemple d'application 3 :

Quelques caractéristiques extraites de la plaque signalétique d'un MAS sont les suivantes : 10 HP, 220 V, 60 Hz, 1750 rpm. Calculez le **couple et le glissement** à pleine charge de ce moteur.

Solution 3 :

☐ Glissement nominal

$$\begin{aligned} n &= 1750 \text{ rpm} \Rightarrow p = 4 \Rightarrow n_s = 1800 \text{ rpm} \Rightarrow s \\ &= \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1750}{1800} = \boxed{2,77 \%} \end{aligned}$$

☐ Couple nominal

$$\begin{aligned} 1 \text{ HP} &= 746 \text{ W} \Rightarrow P_u = 10 \times 746 = 7460 \text{ W} \\ \Rightarrow T_u &= \frac{9,55 P_u}{n} = \frac{9,55 \times 7460}{1750} = \boxed{40,71 \text{ N.m}} \end{aligned}$$

MAS en charge: *Relation puissance, vitesse et couple*

Exemple d'application 4 :

Quelques caractéristiques extraites de la plaque signalétique d'un MAS sont les suivantes : 40 HP, 230 V, 60 Hz, 1710 rpm.

1. Calculez le couple et le glissement à pleine charge de ce moteur.
2. Calculez la vitesse du moteur lorsqu'il produit la moitié du couple nominal
3. Calculez la vitesse lorsque le moteur développe 10 HP.

Solution 4

1. **Glissement nominal:** $n = 1710 \text{ rpm} \Rightarrow p = 4 \Rightarrow n_s = 1800 \text{ rpm} \Rightarrow s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1710}{1800} = \boxed{5\%}$

Couple nominal : $T_u = \frac{9,55 P_u}{n} = \frac{9,55 \times 40 \times 746}{1710} = \boxed{166,6 \text{ N.m}}$

2. **Vitesse pour la moitié du couple** le couple est proportionnel au glissement :

$$K' = \frac{T_n}{s_n} = \frac{166,6}{5} = 33,32 \text{ N.m/\%}$$

Le glissement à **la moitié du couple** sera : $s' = \frac{\frac{166,6}{2}}{33,32} = 2,5 \%$

Ce qui donne : $n = (1 - s)n_s = (1 - 2,5 \%) \times 1800 = \boxed{1755 \text{ rpm}}$

MAS en charge: *Relation puissance, vitesse et couple*

Exemple d'application 4 : Quelques caractéristiques extraites de la plaque signalétique d'un MAS sont les suivantes : 40 HP, 230 V, 60 Hz, 1710 rpm.

1. Calculez le couple et le glissement à pleine charge de ce moteur.
2. Calculez la vitesse du moteur lorsqu'il produit la moitié du couple nominal
3. Calculez la vitesse lorsque le moteur développe 10 HP.

Solution 4 (suite et fin):

3. Vitesse lorsque le moteur développe 10 HP=7460 W

Il faut pour cela déterminer le glissement correspondant comme suit:

$$P = \frac{T \times n}{9,55} = \frac{K's(1-s)n_s}{9,55} = \frac{33,32 \times 1800}{9,55} s(1-s)$$

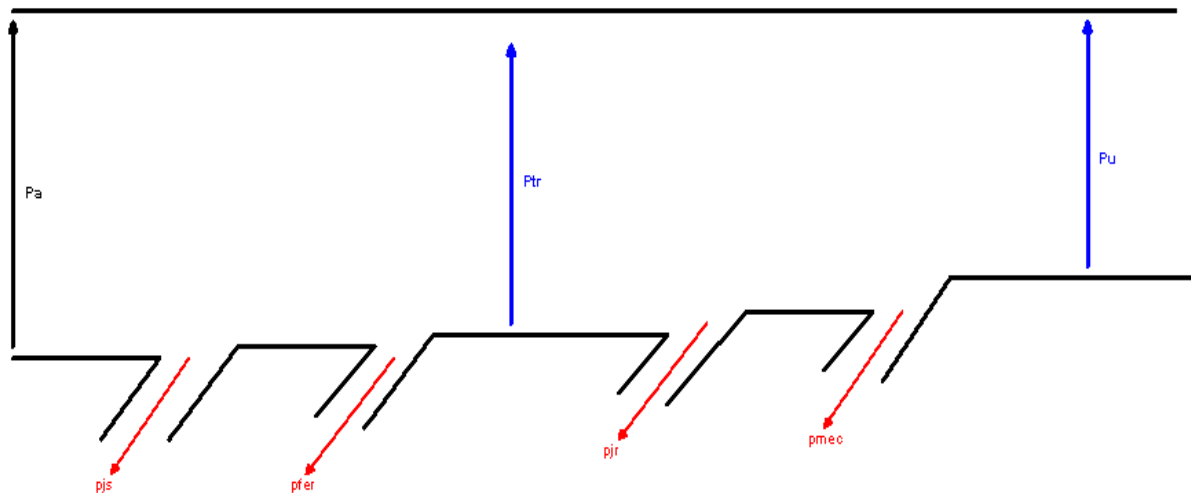
En considérant le fait que $s \ll 1$, cette équation devient:

$$6280,209 s = 7460 \Rightarrow s = \frac{7460}{6280,209} = 1,187 \%$$

La vitesse correspondante sera alors de:

$$n = (1-s)n_s = (1-0,0118) \times 1800 = \boxed{1778,7 \text{ rpm}}$$

MAS en charge: *Bilan de puissance*



$$\text{pertes} = p_{Js} + p_f + p_{jr} + p_{mec}$$

❑ Les principales puissances et leurs synonymes

- ✓ P_a : puissance électrique ou puissance absorbée par le moteur
- ✓ P_{tr} : puissance transmise au rotor ou puissance électromagnétique.
- ✓ P_u : puissance utile ou puissance mécanique transmise à la charge.

❑ Les différentes pertes et leurs significations

- ✓ p_{Js} : pertes Joule au stator.
- ✓ p_f : perte dans le fer (pertes magnétiques).
- ✓ p_{Jr} : pertes Joule au rotor.
- ✓ p_{mec} pertes mécaniques.

MAS en charge: *Bilan de puissance: pertes Joule statoriques*

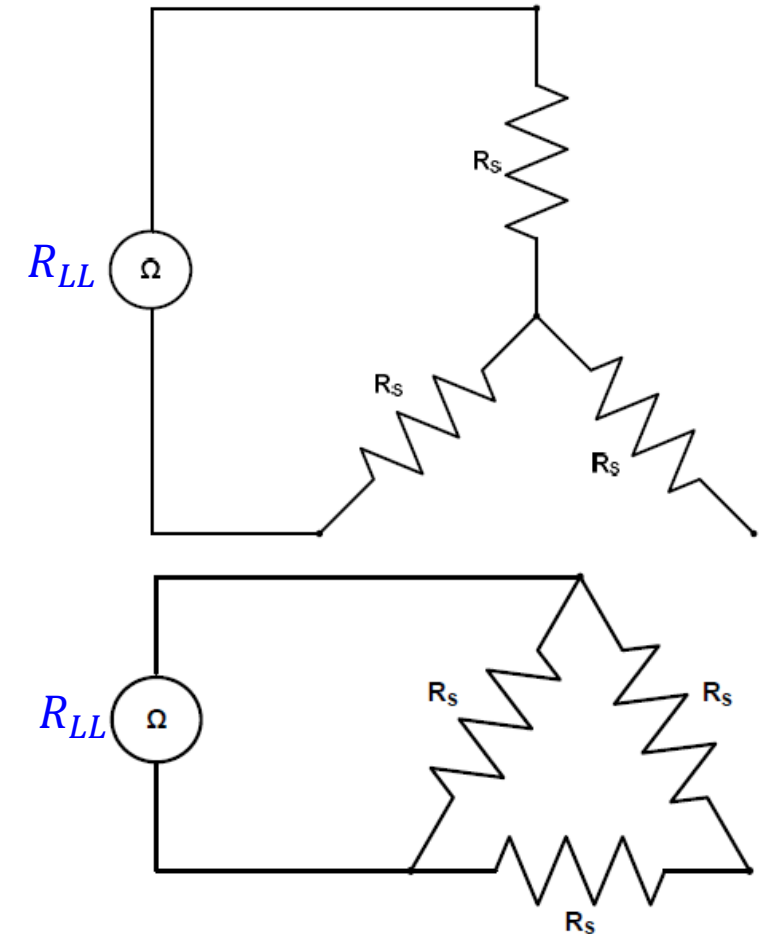
Le stator peut être couplé en **étoile** ou en **triangle**. On notera R_{LL} la **résistance entre deux bornes du stator**.

□ Pour le **couplage étoile**

$$R_{LL} = 2R_S \Rightarrow R_S = \frac{R_{LL}}{2} \Rightarrow p_{Js} = 3R_S I_L^2 = \frac{3}{2} R_{LL} I_L^2$$

□ Pour un **couplage triangle** :

$$\begin{aligned} R_{LL} &= \frac{(R_S)(2R_S)}{3R_S} = \frac{2}{3} R_S \Rightarrow R_S = \frac{3}{2} R_{LL} \Rightarrow p_{Js} = 3R_S I_{ph}^2 \\ &= 3 \left(\frac{3}{2} R_{LL} \right) \frac{I_L^2}{3} = \frac{3}{2} R_{LL} I_L^2 \end{aligned}$$

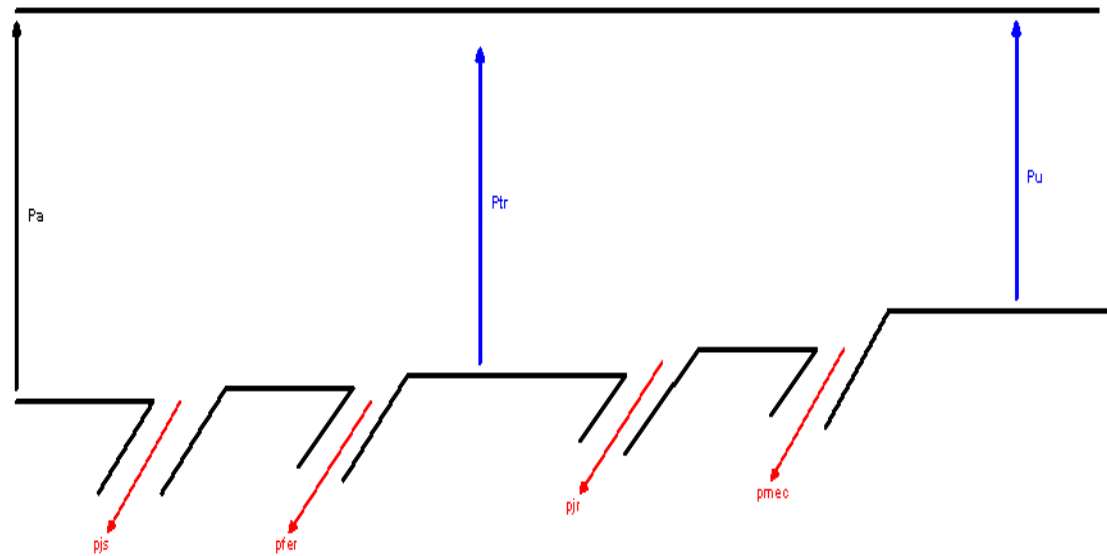


- ❑ Les **pertes fer** (p_{fer}) et les **pertes rotationnelles** (p_{mec}) contrairement aux autres pertes ne sont pas mesurables à chaque instant.
- ❑ Les **pertes fer** sont fonction du **champ magnétique**.
- ❑ Les **pertes rotationnelles** sont dues à la résistance de l'air.
- ❑ Ces deux catégories de pertes sont alors regroupées dans un ensemble de pertes appelées **pertes collectives**.
- ❑ Pertes Joule rotoriques : $p_{jr} = sP_{tr}$
- ❑ **Puissance électromagnétique**

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr}$$

Remarques

- ❑ Les pertes dans les enroulements rotoriques **augmentent avec le glissement**.
- ❑ Au **démarrage** ($s = 1$), **toute** l'énergie transmise au rotor est **dissipée sous forme de chaleur**.
- ❑ À vide ($n \rightarrow n_s$) le glissement est presque nulle de même que **les pertes Joule rotoriques**.
- ❑ La puissance absorbée **à vide par le MAS représente les pertes collectives**.



□ Puissance absorbée

$$P_a = \sqrt{3}V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi = \sqrt{3}V_L \cdot I_L \cdot FP = S_a \times FP$$

□ Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \text{pertes}}{P_a} = \frac{P_a - p_{js} - p_f - p_{jr} - p_{mec}}{P_a} = \frac{P_{tr} - p_{jr} - p_{mec}}{P_a}$$

MAS en charge: *Rendement*

Exemple d'application: Un MAS triphasé à 4 pôles, est alimenté sous une tension 380 V-50 Hz. La résistance mesurée entre deux bornes du stator est de $0,9 \Omega$. En fonctionnement à **vide**, le moteur absorbe une puissance de 420 W.

1. Calculez les pertes collectives (perte fer plus pertes mécaniques) du MAS.
2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.
 - a. Calculez l'intensité du courant absorbé.
 - b. Calculez les pertes Joule au stator.
 - c. Calculez le glissement et la vitesse du moteur. Supposez que les pertes fer sont égales aux pertes mécaniques.
 - d. Calcul le couple utile du MAS.

Solution 5

1. Calcul des pertes collectives (perte fer plus pertes mécaniques) du MAS.

La puissance mesurée à vide représente l'ensemble des pertes collectives.

$$P_c = p_f + p_{mec} = \boxed{420 \text{ W}}$$

2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.

a. Calcul de l'intensité du courant absorbé.

On obtient la puissance absorbée comme suit :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{4000}{0,87} = 4597,7 \text{ W}$$

MAS en charge: *Rendement*

Exemple d'application 5: Un MAS triphasé à 4 pôles est alimenté sous une tension 380 V-60 Hz. La résistance mesurée entre deux bornes du stator est de $0,9 \Omega$. En fonctionnement à **vide**, le moteur absorbe une puissance de 420 W.

1. Calculez les pertes collectives (perte fer plus pertes mécaniques) du MAS.
2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.
 - a. Calculez l'intensité du courant absorbé.
 - b. Calculez les pertes Joule au stator.
 - c. Calculez le glissement et la vitesse du moteur. Supposez que les pertes fer sont égales aux pertes mécaniques.
 - d. Calcul le couple utile du MAS.

Solution 5 (suite)

2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.

a. Calcul de l'intensité du courant absorbé.

On obtient la puissance absorbée comme suit :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{4000}{0,87} = 4597,7 \text{ W}$$

Ce qui donne un courant de ligne de :

$$I_L = \frac{P_a}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} = \frac{4597,7}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,85} = 8,218 \approx \boxed{8,22 \text{ A}}$$

MAS en charge: *Rendement*

Exemple d'application 5: Un MAS triphasé à 4 pôles est alimenté sous une tension 380 V-50 Hz. La résistance mesurée entre deux bornes du stator est de $0,9 \Omega$. En fonctionnement à **vide**, le moteur absorbe une puissance de 420 W.

1. Calculez les pertes collectives (perte fer plus pertes mécaniques) du MAS.
2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.
 - a. Calculez l'intensité du courant absorbé.
 - b. Calculez les pertes Joule au stator.
 - c. Calculez le glissement et la vitesse du moteur. Supposez que les pertes fer sont égales aux pertes mécaniques.
 - d. Calcul du couple utile du MAS.

Solution 5 (suite)

2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.

b. Calcul des pertes Joule au stator.

$$P_{Js} = \frac{3}{2} R_{LL} I_L^2 = \frac{3}{2} \times 0,9 \times 8,22^2 = \boxed{91,2 \text{ W}}$$

c. Calcul du glissement et la vitesse du moteur.
L'ensemble des pertes donne :

$$\begin{aligned} \text{pertes} &= P_a - P_u = 4597,7 - 4000 \\ &= 597,7 \text{ W} \end{aligned}$$

Ce qui donne alors :

$$\begin{aligned} p_{Js} + p_f + p_{jr} + p_{mec} &= 597,7 \Rightarrow p_{jr} \\ &= 597,7 - \underbrace{p_{mec} - p_f - p_{Js}}_{420} = 86,5 \text{ W} \end{aligned}$$

MAS en charge: *Rendement*

Solution 5 (suite)

2. En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance est de 0,85 et le rendement de 0,87.

c. Calcul du glissement et la vitesse du moteur. L'ensemble des pertes donne :

$$\begin{aligned} \text{pertes} &= P_a - P_u = 4597,7 - 4000 \\ &= 597,7 \text{ W} \end{aligned}$$

Ce qui donne alors :

$$\begin{aligned} p_{Js} + p_f + p_{jr} + p_{mec} &= 597,7 \Rightarrow P_{jr} \\ &= 597,7 - \underbrace{P_{mec} + P_f}_{420} - P_{Js} \\ &= 86,5 \text{ W} \end{aligned}$$

On en déduit le glissement comme suit :

$$p_{jr} = sP_{tr}$$

Avec :

$$\begin{aligned} P_{tr} &= P_a - p_{Js} - p_f = 4597,7 - 91,2 - \frac{420}{2} \\ &= 4296,5 \text{ W} \end{aligned}$$

Ce qui donne alors :

$$s = \frac{p_{jr}}{P_{tr}} = \frac{86,5}{4296,5} = \boxed{0,02}$$

Vitesse de rotation

$$\begin{aligned} n &= (1 - s)n_s = (1 - 0,02) \times \frac{120 f}{p} \\ &= (1 - 0,02) \times \frac{120 \times 60}{4} = \boxed{1764 \text{ rpm}} \end{aligned}$$

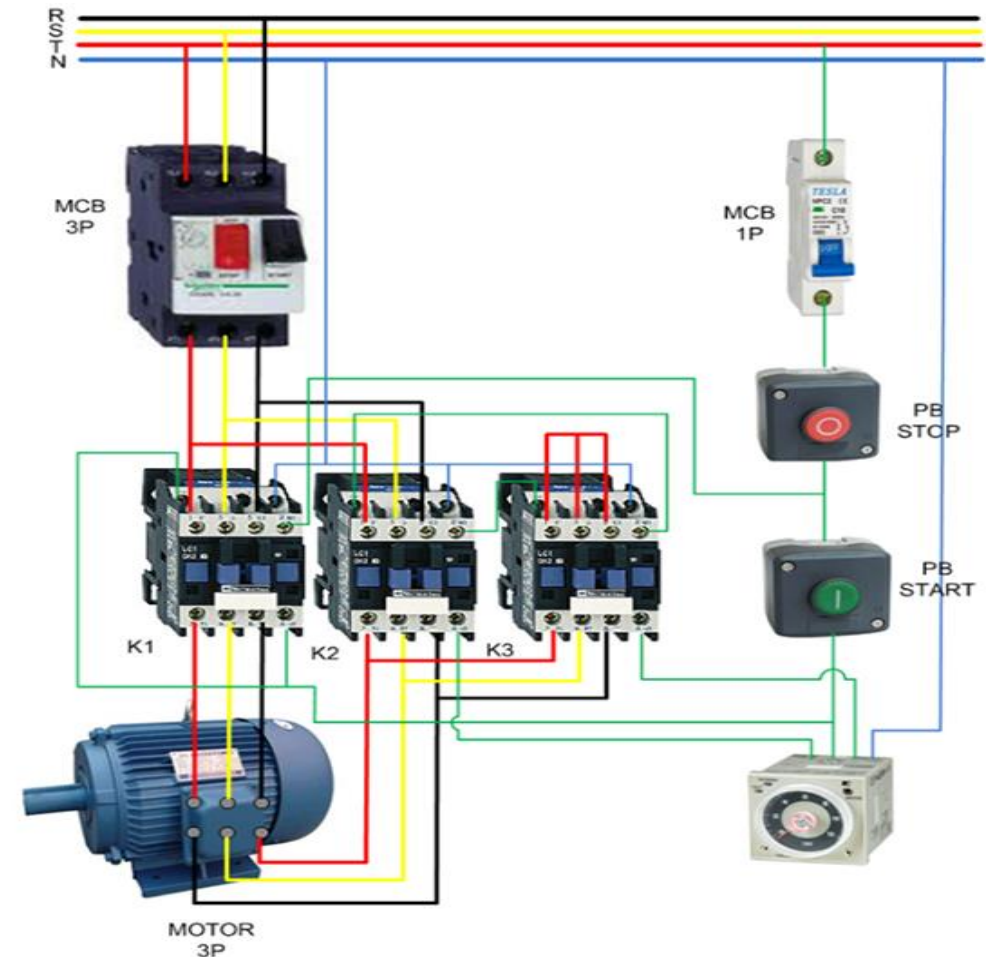
d. Calcul le couple utile du MAS.

$$T_u = \frac{9,55 P_u}{n} = \frac{9,55 \times 4000}{1764} = \boxed{21,655 \text{ N.m}}$$

Variation de la vitesse d'un MAS: *démarrage direct*

Le **démarrage direct** des moteurs sur un réseau électrique est la solution la plus répandue et la plus convenable pour une grande variété de machines

Source: <https://elec13.files.wordpress.com/2016/10/demarr-mas-3.png>



Variation de la vitesse d'un MAS: **démarrage direct (inconvenients)**

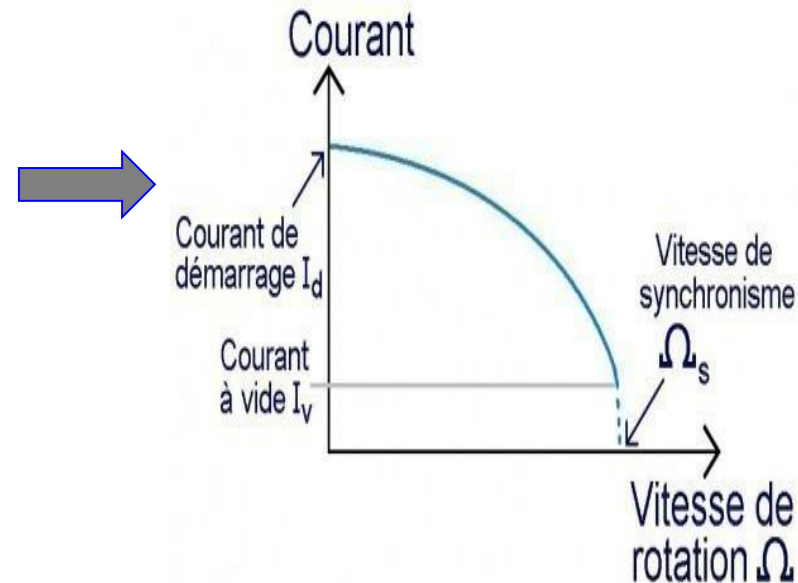
Le démarrage direct s'accompagne cependant de quelques contraintes gênantes ou inconvenients parmi ceux-ci on distingue:

Appel de courant important au démarrage : cela peut perturber la marche d'autres appareils connectés sur le même réseau

Démarrage à coups: inacceptables pour la machine ou pour le confort et la sécurité des usagers.

Impossibilité de contrôler l'accélération et la décélération

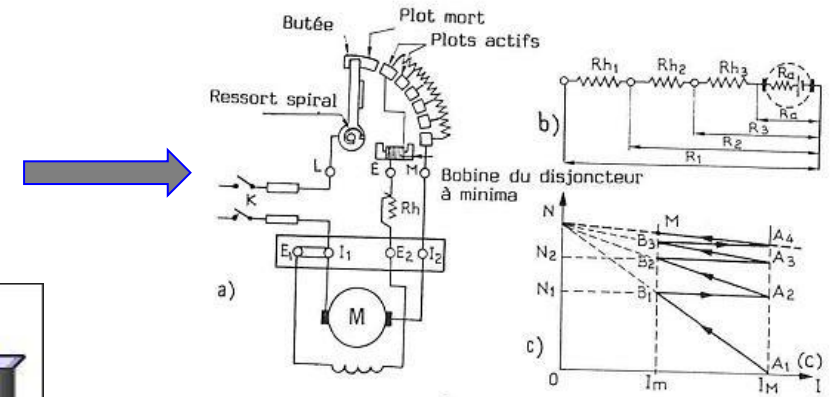
Impossibilité de faire varier la vitesse



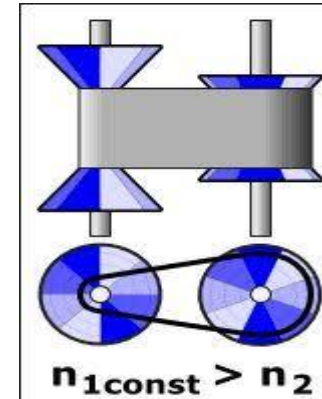
Variation de la vitesse d'un MAS: **démarrage direct** (**inconvenients**)

Pour surmonter ces inconvenients, la possibilité de pouvoir faire varier la vitesse des moteurs a été envisagée.

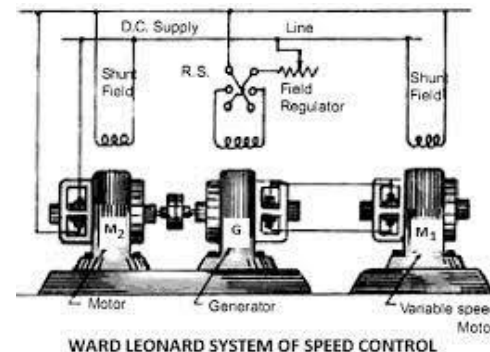
Première solution: **démarreur
rhéostatique pour les moteurs DC**



Deuxième solution: **Variateurs mécaniques
avec des réducteurs.**



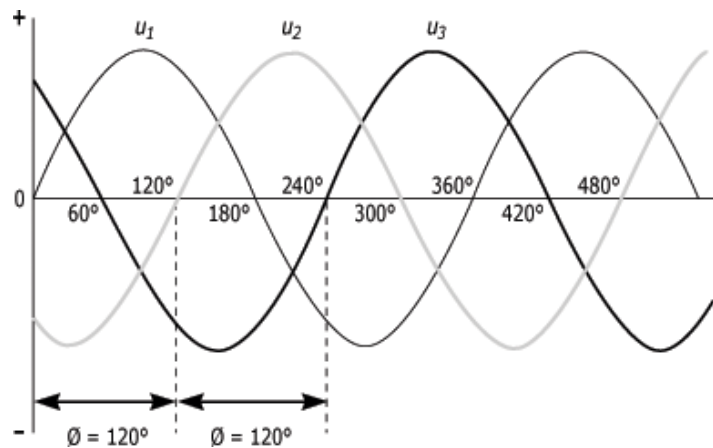
Troisième solution: **Groupe
moteur générateur aussi
appelés groupe tournant de
WARD LEONARD.**



On utilise un moteur pour entraîner une génératrice dont on fait varier la sortie de la génératrice alimente le moteur dont on veut faire varier la vitesse.

Variation de la vitesse d'un MAS: *Le variateur de vitesse*

- ❑ Aujourd'hui les solutions pour faire varier la vitesse des moteurs dans l'industrie sont les **démarreurs électroniques** ou **variateurs de vitesse**.
- ❑ Un **variateur de vitesse** ou **drive** est un convertisseur d'énergie dont le rôle est de *moduler l'énergie électrique fournie au moteur*. Le variateur de vitesse est toujours intercalé entre la source et le moteur à contrôler.



Variateur de vitesse
Sinamics Siemens



Moteur asynchrone triphasé



Source : <https://www.automation-sense.com/medias/images/fonctionnement-variateur-de-vitesse.jpg>

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est définie par:

$$n = (1 - s) \frac{120f}{P}$$

s : glissement

P : nombre de pôles

f : fréquence du réseau (Hz)

n : vitesse du moteur en tr/min

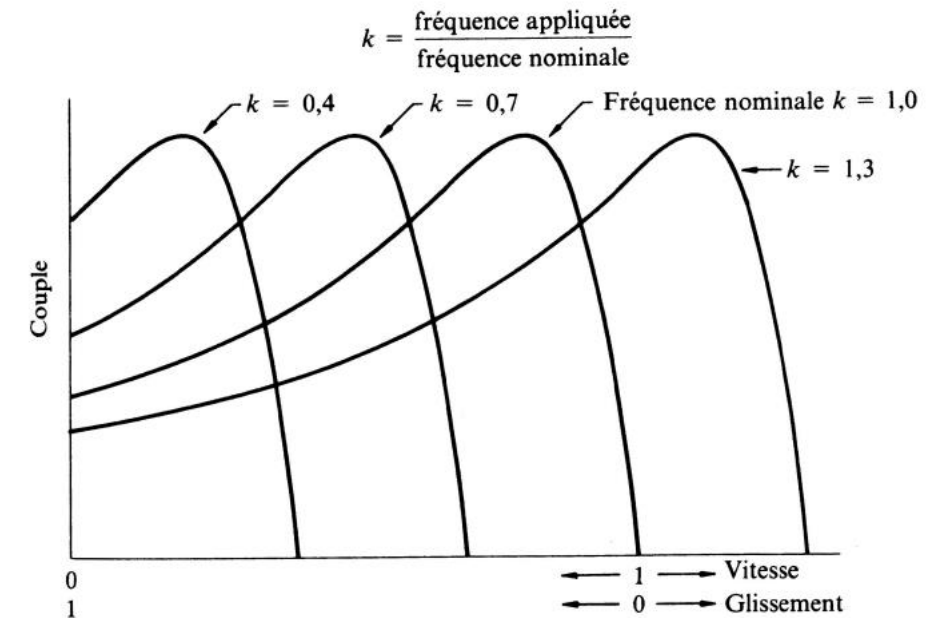
Le réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone peut être obtenu par:

Action sur le nombre de pôles: P

Action sur la fréquence du réseau: f

Action sur le glissement: s

- ❑ **Action sur le nombre de pôles** : technique utilisée lors de la construction des moteurs à cage avec un stator comportant plusieurs enroulements à nombre de pôles différents.
- ❑ **Action sur le glissement**: pour cela, on agit sur la résistance des enroulements rotoriques (rotor bobiné). L'inconvénient est la diminution du rendement.
- ❑ **Action sur la fréquence**: c'est le meilleur moyen de faire varier la vitesse de rotation des MAS. La figure ci-contre montre la déformation de la caractéristique mécanique sous l'effet de la variation de fréquence.



Variation de la vitesse d'un MAS: *Type de variateurs*

Il existe deux méthodes de commande:

- ❑ La **commande V/f** (tension/fréquence) **scalaire**.

Ce mode de fonctionnement est intéressant pour les charges à couple constant. Exemple : Variateur **ACS 800**.

- ❑ La **commande vectorielle de flux** (VVC pour Voltage Vector Control): ce mode de fonctionnement permet de réguler précisément la vitesse. Exemple de l'**Altivar 71**.



Variateur ACS 800

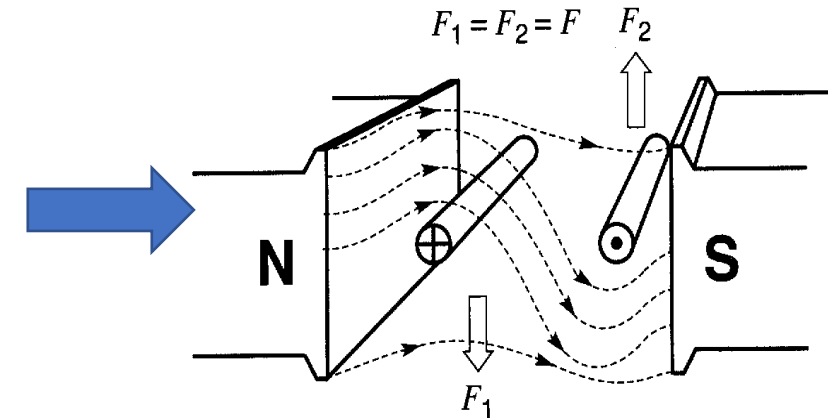


Variateur Altivar 71

Variation de la vitesse d'un MAS: *commande V/f scalaire*

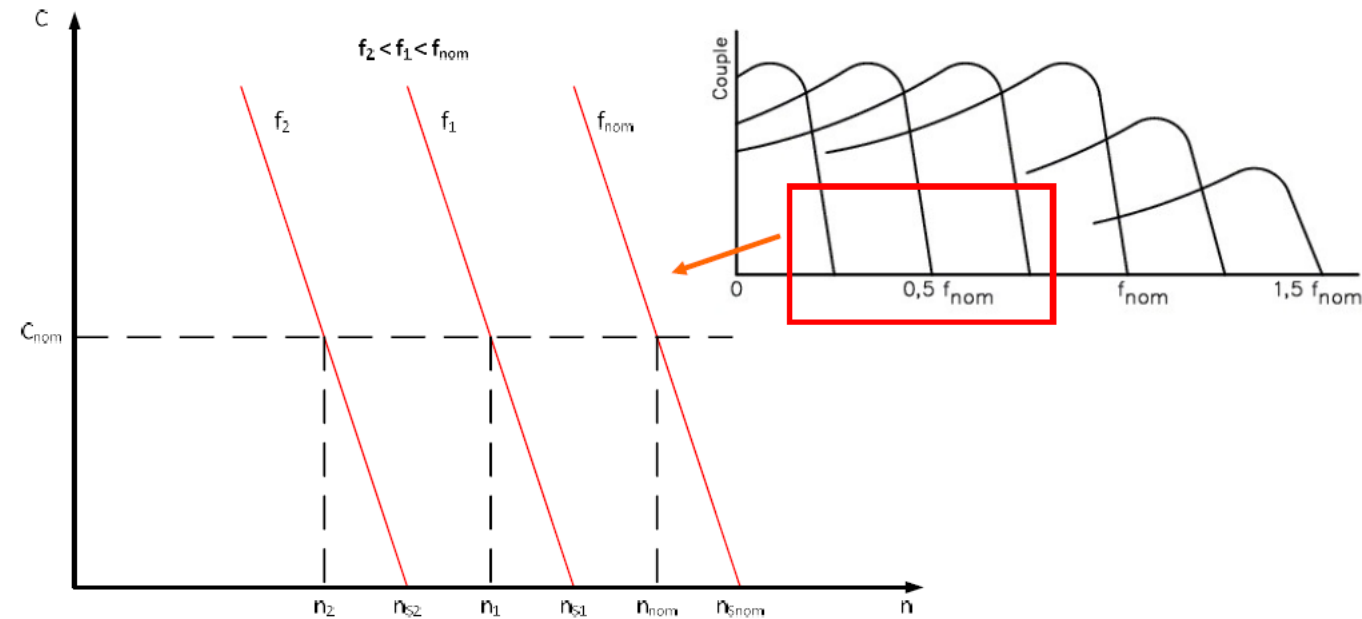
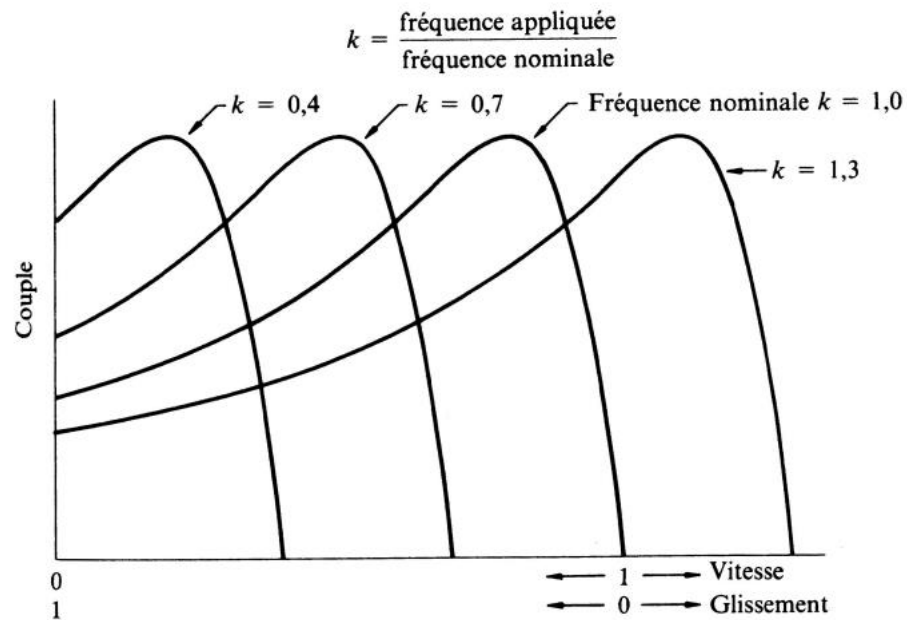
- ❑ En régime nominal, le circuit magnétique d'une machine asynchrone est à la limite de la saturation. En ce moment le flux est maximal et donc le champ magnétique aussi : $B_n = B_{max}$.
- ❑ L'objectif du variateur est alors de maintenir la valeur maximale du champ magnétique sans arriver à la saturation.
- ❑ Le couple dépend du champ magnétique car on a
 $T \text{ (en N.m)} = \text{Force (N)} \times \text{distance (m)}$
 Avec F qui dépend du champ magnétique: $F=B \times I \times L$
- ❑ la vitesse dépend de la tension comme suit:

$$V = B \times \ell \times \underbrace{v}_{k \times f} = B \times \ell \times k \times f \Rightarrow B = \frac{V}{f} \times \ell \times k$$



Conclusion : Pour maintenir un couple constant, on doit avoir un *champ magnétique constant* et pour cela il faut un rapport **Tension/fréquence constant**.

Variation de la vitesse d'un MAS: *Stratégie de la commande V/f scalaire*



La vitesse de glissement est maintenue constante

$$n_g = n_s - n_n = n_{s_{nom}} - n_{nom} = n_{s_1} - n_1 = n_{s_2} - n_2$$

Variation de la vitesse d'un MAS: **commande V/f scalaire**

Exemple d'application 6

Énoncé: Calculez la **vitesse de rotation** et le **courant tiré** par un MAS triphasé alimenté à une fréquence de **30 Hz**, lorsque le moteur produit son couple nominal. Le rendement du moteur est de 84 %, son facteur de puissance est égal à 0,78.

Les caractéristiques du moteur sont: 40 HP, 230 V, 60 Hz, 1710 rpm.

À venir

Cours 7: Système d'éclairage

Solution 6:

- ☐ Vitesse synchrone et nombre de pôles

$$n_n = 1710 \text{ rpm}, \quad f = 60 \text{ Hz} \Rightarrow \begin{cases} n_s = 1800 \text{ rpm} \\ p = 4 \end{cases}$$

- ☐ Couple nominal: $T_n = \frac{9,55 \times P_u}{n_n} = \frac{9,55 \times 40 \times 746}{1710} = \mathbf{166,65 \text{ N.m}}$

- ☐ Vitesse de glissement: $n_g = n_s - n_n = 1800 - 1710 = 90 \text{ rpm}$

- ☐ Vitesse synchrone à 30 Hz: $n_{s_{30}} = \frac{120 \times 30}{4} = \mathbf{900 \text{ rpm}}$

- ☐ **Vitesse à 30 Hz:** la vitesse de glissement est maintenue constante et donc:

$$n_{30} = n_{s_{30}} - n_g = 900 - 90 = \mathbf{810 \text{ rpm}}$$

- ☐ Puissance utile à 30 Hz: (le couple est maintenu constant) et donc:

$$P_{u_{30}} = \frac{T_n \times n_{30}}{9,55} = \frac{166,65 \times 810}{9,55} = \mathbf{14134,712 \text{ W}}$$

- ☐ Puissance électrique absorbée: $P_{a_{30}} = \frac{P_{u_{30}}}{\eta} = \frac{14134,712}{0,84} = \mathbf{16827,038 \text{ W}}$

- ☐ Courant absorbé: la tension de ligne devient: $\frac{230 \times 30}{60} = \mathbf{115 \text{ V}}$ ce qui donne:

$$I_{L_{30}} = \frac{P_{a_{30}}}{\sqrt{3} \times 115 \times FP} = \frac{16827,038}{\sqrt{3} \times 115 \times 0,78} = \mathbf{108,3 \text{ A}}$$