


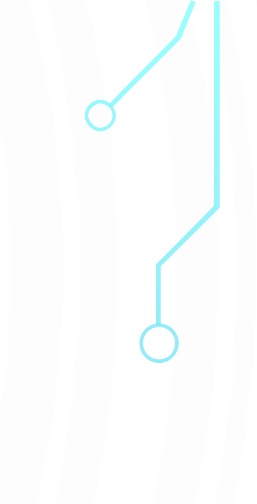
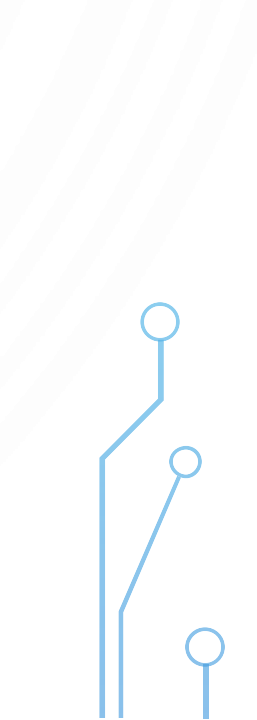
The background features a series of concentric, light gray circles centered in the frame. Overlaid on these are stylized, light blue circuit-like lines. These lines are most prominent on the left and right edges, where they form vertical and diagonal paths with small circular nodes, resembling a printed circuit board or a digital network. The overall aesthetic is clean, modern, and technical.

# R4.05 CONVERTISSEURS D'ENERGIE

MOTORISATION

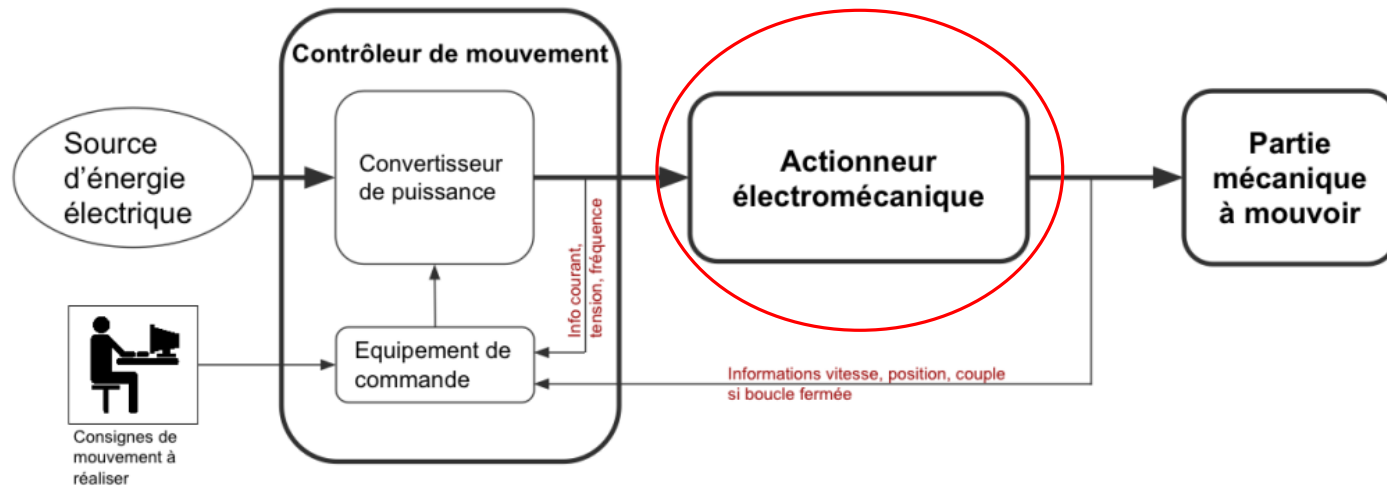


# SOMMAIRE

- Généralités électromécaniques
  - Machine à courant continu
  - Champs tournant
  - Machine synchrone
  - Moteur pas à pas
  - Machine asynchrone
- 
- 
- 

# GÉNÉRALITÉS : OBJECTIFS

- Modélisations des convertisseurs pour l'automatisme et la robotique

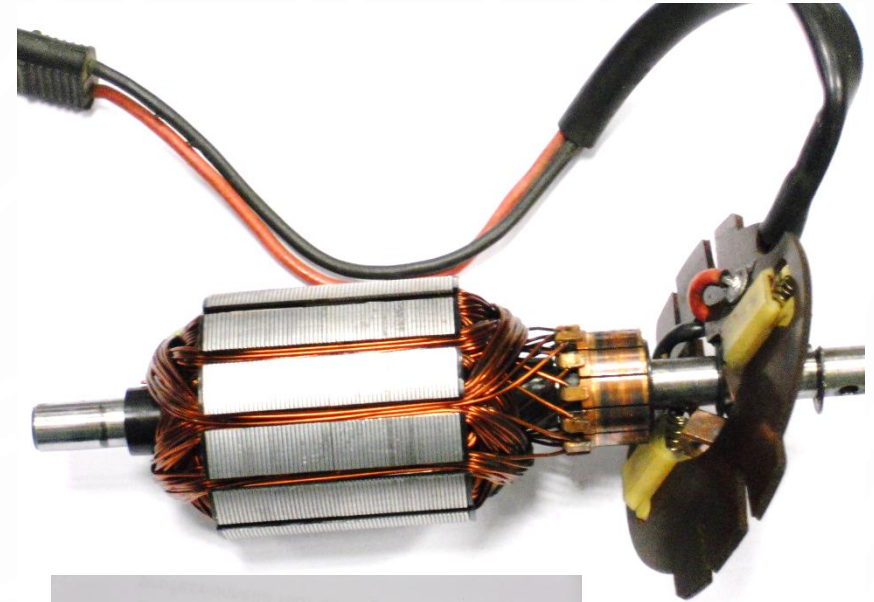
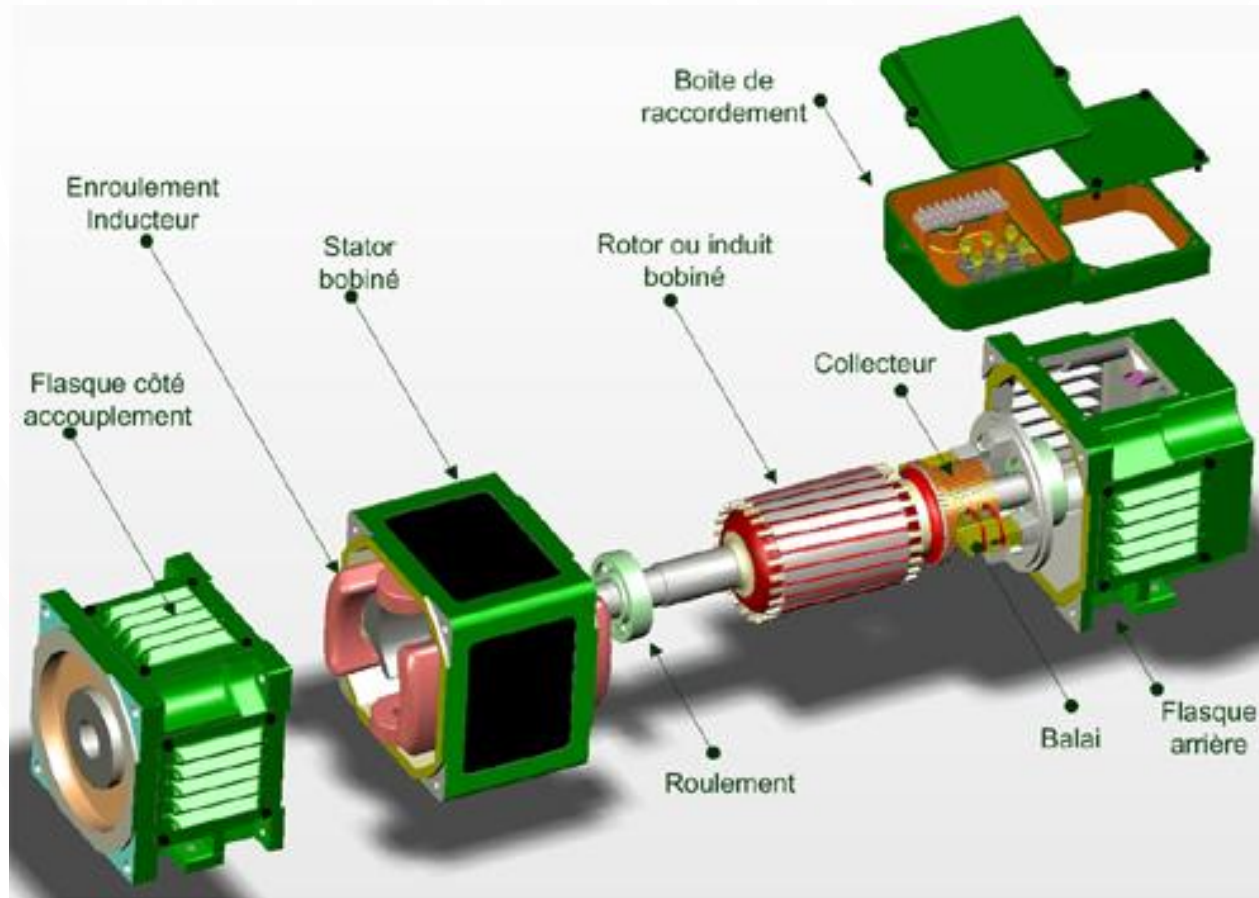


- La partie « convertisseur de puissance » sera traitée ultérieurement

# GÉNÉRALITÉS : PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE

- $J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r - f\Omega$
- $C_m$  couple moteur
- $C_r$  couple résistant
- Position  $\theta$  :  $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$

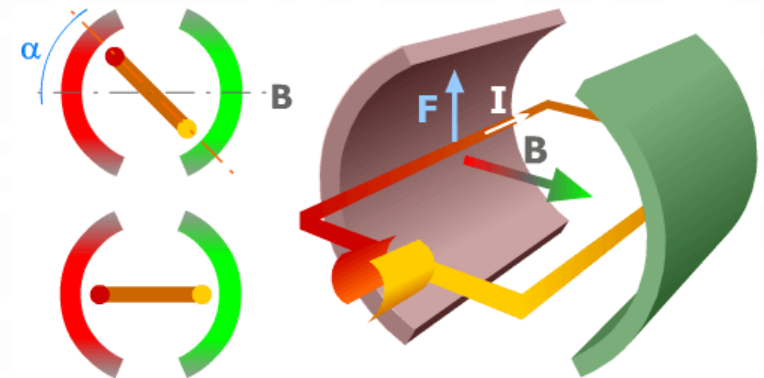
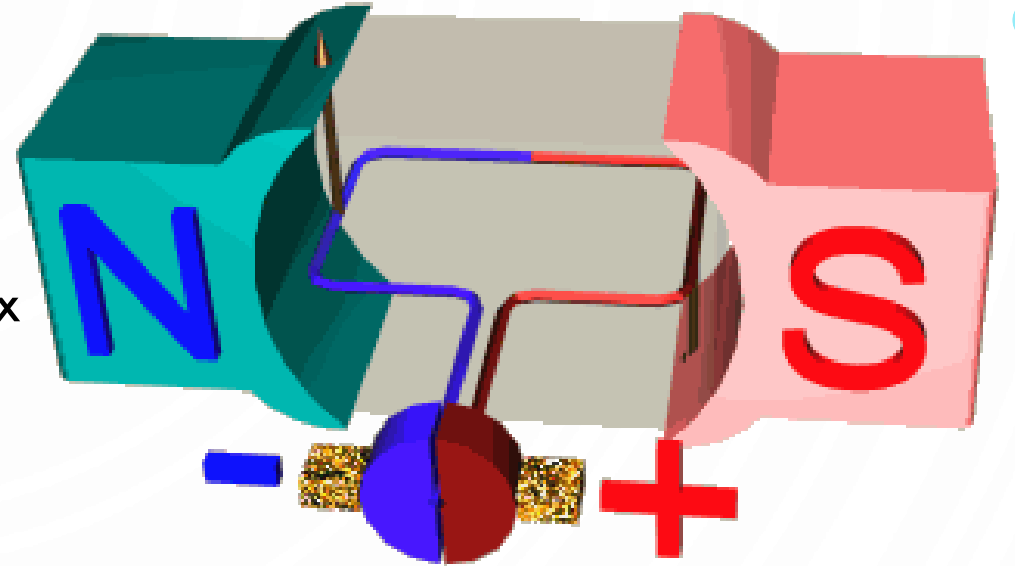
# MOTEUR À COURANT CONTINU: CONSTITUTION



# MOTEUR À COURANT CONTINU

## FONCTIONNEMENT

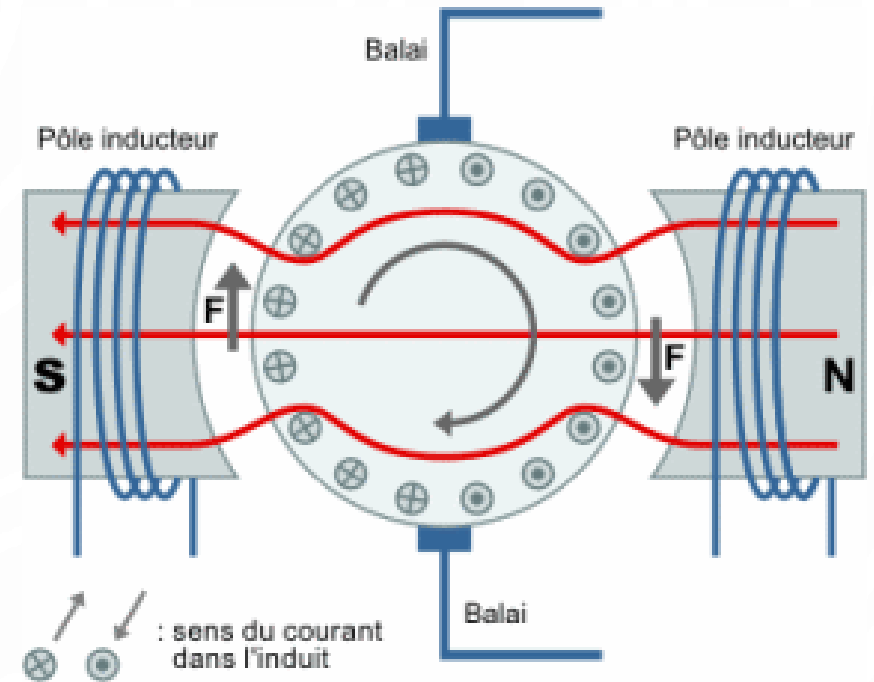
- Le collecteur: élément essentiel
- Le passage du courant dans la bobine crée deux forces de Laplace ( couple moteur)
- Le couple est nul lorsque la bobine est alignée avec le champ magnétique de l'induit
- Il faut inverser le sens de passage du courant : c'est le rôle du collecteur
- Avec une spire  $C_m = K B S I \cos \alpha$



# MOTEUR À COURANT CONTINU

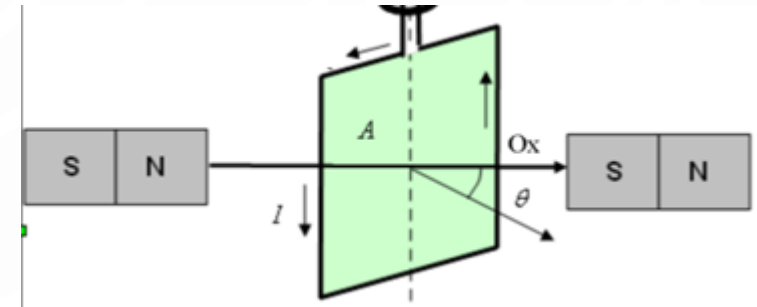
## FONCTIONNEMENT

- En fait il y a plusieurs bobines en série, formant un circuit fermé
- Les balais assurent la permanence/immobilisé du sens du courant malgré la rotation du rotor
- La présence de plusieurs bobines assure un couple constant
- $C_m = K\Phi I$
- Si le champ magnétique est constant,  $\Phi$  est constant,
- **le couple est proportionnel au courant**



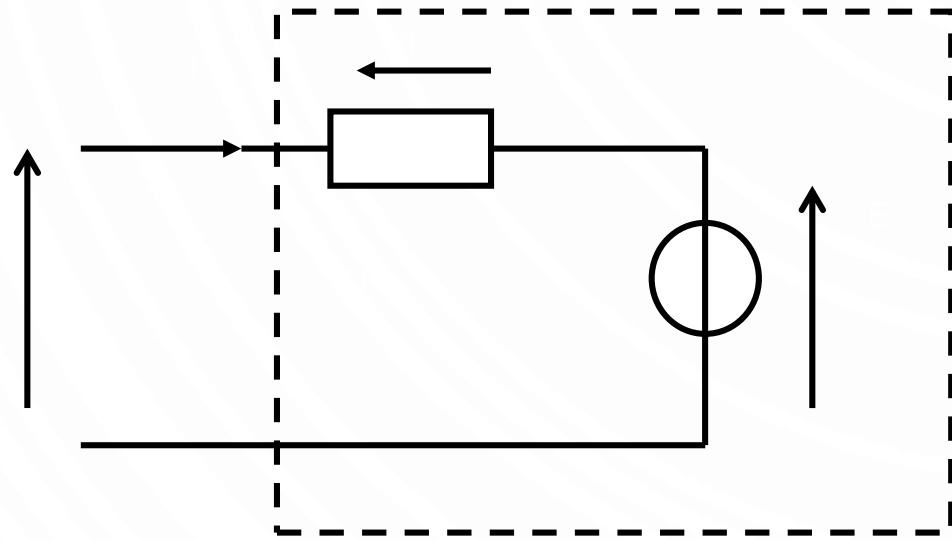
# FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE

- Lorsque la machine tourne, le flux du champ magnétique à travers chaque spire varie, il apparaît une force électromotrice  $e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\vec{B} \cdot \vec{S}}{dt}$
- Si le rotor tourne à la vitesse angulaire  $\Omega$
- $e = \Omega B S \cos(\Omega t) = \Phi \Omega \cos(\Omega t)$
- Du fait de la présence de l'ensemble des bobines  $E = K \Phi \Omega$
- La force électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire





# MODÉLISATION EN RÉGIME PERMANENT

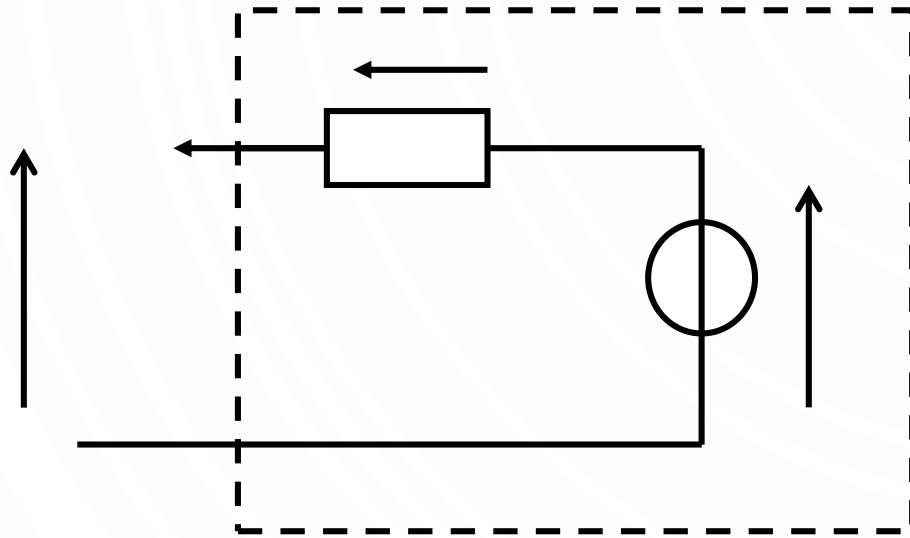


On modélise une MMC par:

- Une force électromotrice  $E$  proportionnelle à la vitesse de rotation  $E = K\Omega$
- Une résistance interne des bobinage  $R$
- Le couple  $T$  est proportionnel au courant  $C_m = KI$
- sans perte mécanique  $P_{mec} = C_m\Omega = EI$
- $C_m = \frac{EI}{\Omega}$

En charge la tension d'alimentation  $U$  n'est pas proportionnelle à la vitesse de rotation  $\Omega$

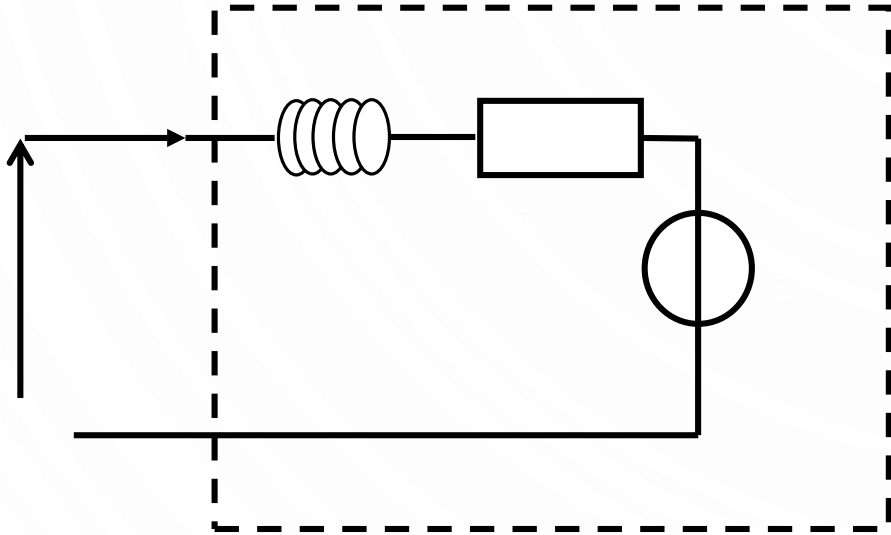
# LA DYNAMO TACHYMÉTRIQUE



- Une force électromotrice  $E$  proportionnelle à la vitesse de rotation  $E = K' \Omega$
- $I = 0$  utilisation à vide
- $U_d T = E = K' \Omega$

Une dynamo tachymétrique est un capteur de vitesse

# MODÉLISATION COMPLÈTE



On modélise une MMC par:

- Une force électromotrice  $E$  proportionnelle à la vitesse de rotation  $E = K\Omega$
- Une résistance interne des bobinage  $R$
- Une inductance  $L$  due aux enroulements de l'induit. ( le courant ne peut pas varier instantanément

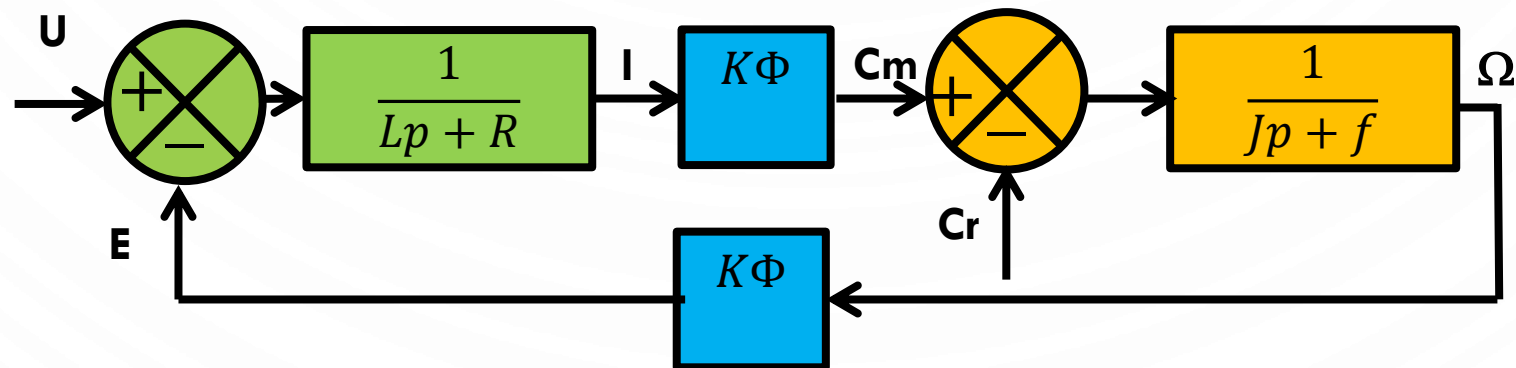
# MCC ASSERVISSEMENT

- $U = E + Ri + L \frac{di}{dt}$
- $E = \frac{\Omega}{K\Phi}$
- $Cm = K\Phi I$
- $J \frac{d\Omega}{dt} = Cm - Cr - f\Omega$

- Le moteur cherchera toujours à tourner, autrement dit proposera toujours un couple moteur équivalent au couple résistant.

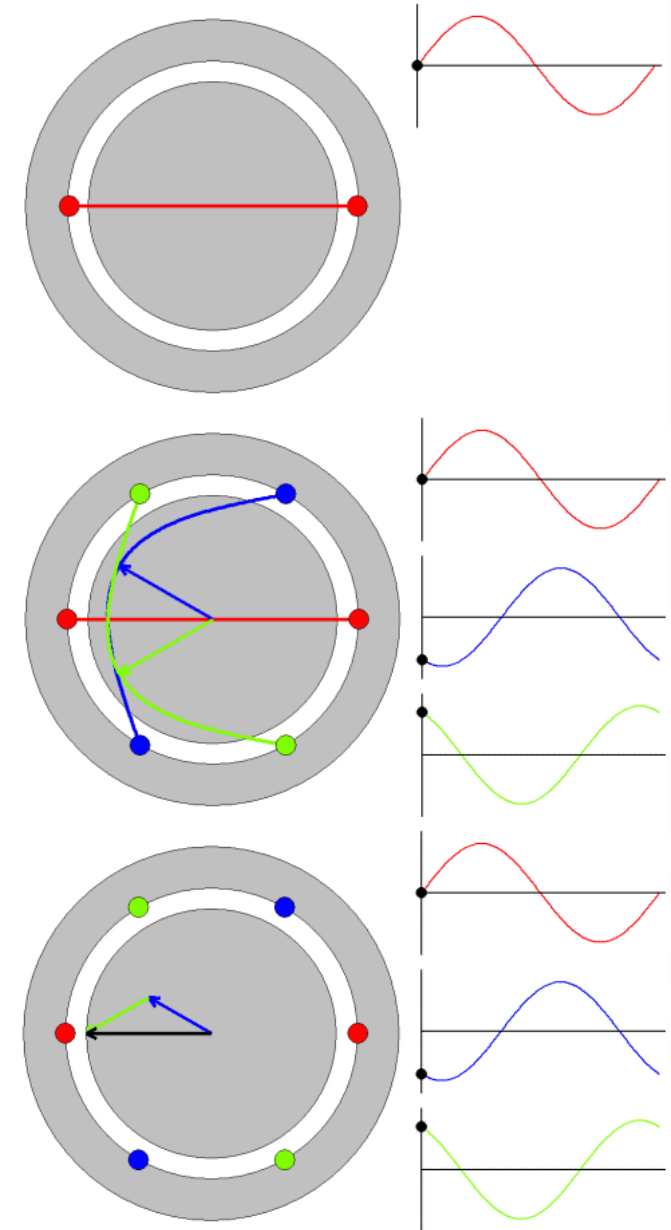
Si ce couple résistant est important, le courant dans le moteur risque d'endommager ce dernier.

Comme on ne maîtrise pas le courant, il faut alors le mesurer, le comparer à une consigne acceptable et commander le moteur en conséquence. On réalise alors une boucle de courant nécessaire pour la sécurité.



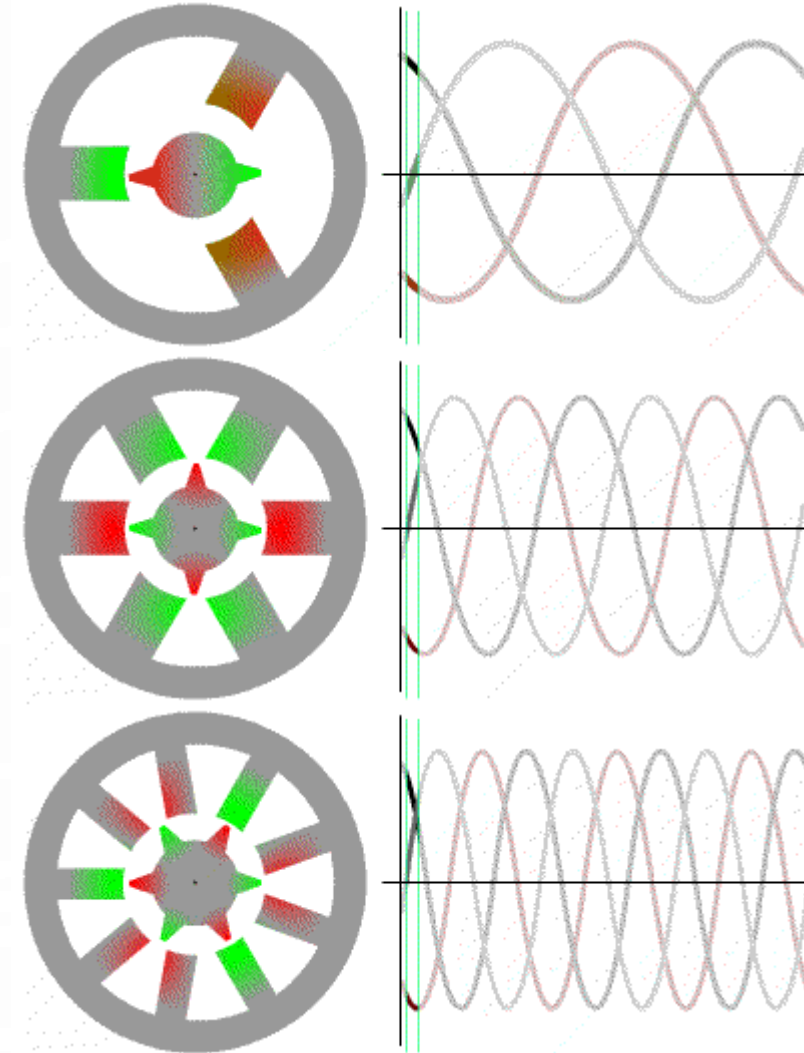
# CHAMP STATORIQUE TOURNANT

- **Théorème de Ferraris** :  $p$  systèmes de bobines triphasées répartis régulièrement sur le périmètre d'un entrefer parcourus par des courants triphasés de pulsation  $\omega$ , créent  $p$  paires de pôles d'un champ tournant de pulsation de rotation  $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$
- la valeur du champ est maximale en un point de l'axe de la bobine quand l'intensité du courant est maximale dans cette bobine



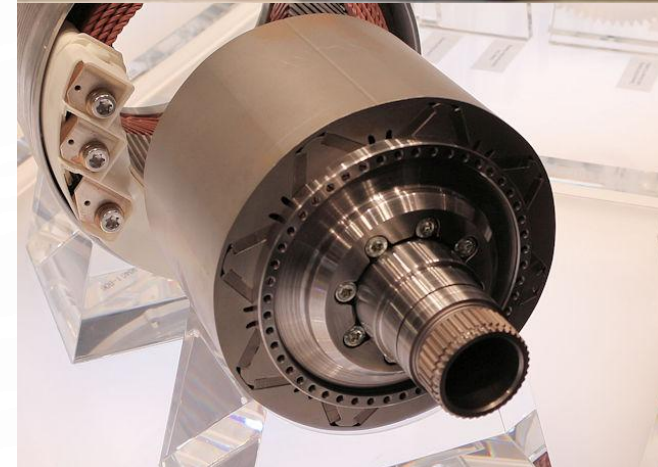
# CHAMP STATORIQUE TOURNANT

- $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$
- $N_s = \frac{\Omega_s * 60}{2\pi}$  vitesse de rotation du champ statorique pour  $f=50\text{Hz}$
- $p = 1$  alors  $N_s = 3000 \text{ tr/min}$
- $p = 2$  alors  $N_s = 1500 \text{ tr/min}$
- $p = 3$  alors  $N_s = 1000 \text{ tr/min}$
- $p = 4$  alors  $N_s = 750 \text{ tr/min}$
- $B_s = \frac{3}{2} B_{max} \cos(\omega t - p\theta)$
- $B_s = \frac{3}{2} K I_{max} \cos(p(\Omega_s t - \theta))$



# MACHINE SYNCHRONE : CONSTITUTION

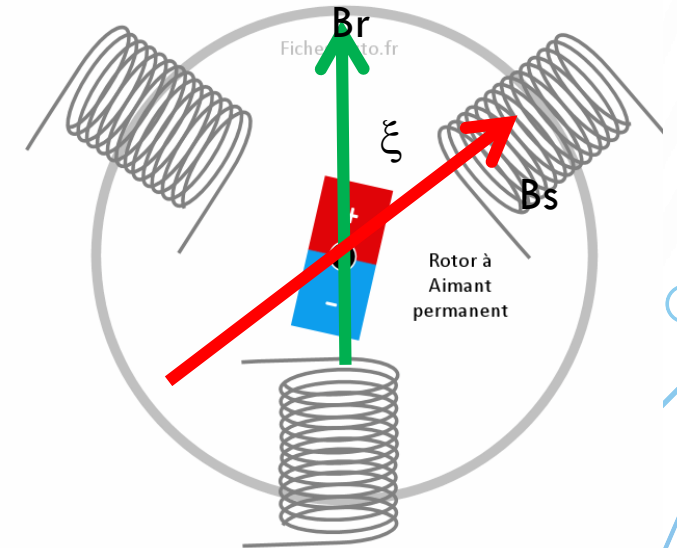
- Le stator ( induit) est constitué d'un ensemble de bobinages générant un champ magnétique tournant
- Le rotor ( inducteur) est constitué soit de p aimants permanents soit de bobinages alimentés en courants continus
- Le rotor peut avoir des pôles saillants ou lisses





# MACHINE SYNCHRONES : FONCTIONNEMENT

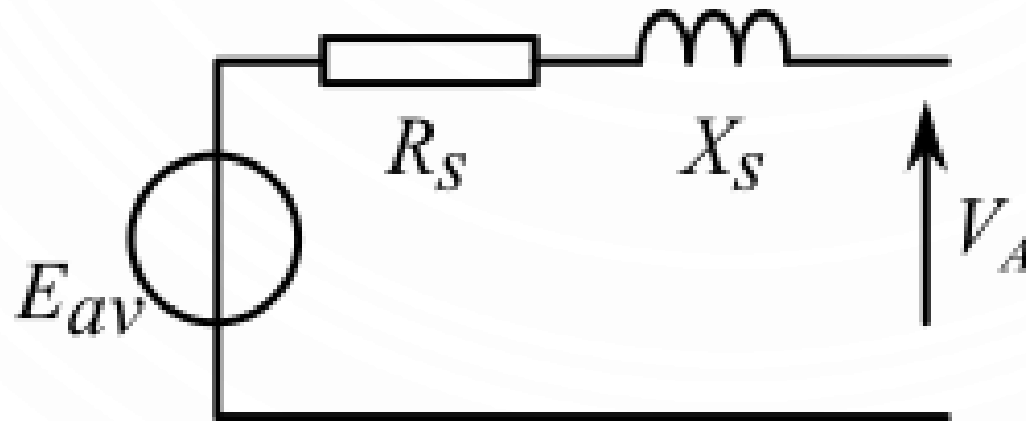
- Le rotor crée un champ magnétique constant ( soit grâce aux aimants soit grâce à des courants continus)
- Le rotor tourne à la vitesse angulaire  $\Omega$
- Le champ rotorique a donc pour expression :  $B_r = B_r \cos(p(\Omega t - \theta))$
- par induction il génère une fem  $E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\phi_{max}\Omega \sin(p(\Omega t - \theta)) = E \sin(p(\Omega t - \theta))$  dans l'enroulement
- Dans cet enroulement circule un courant  $i$  de la forme  $i = I \sin(p(\Omega_s t - \theta - \Psi))$
- $C_m = 3 \frac{\vec{E} \cdot \vec{i}}{\Omega} = 3 \frac{EI}{\Omega} \cos(p(\Omega + \Omega_s)t - 2\theta - \Psi) \times \cos(p(\Omega - \Omega_s)t + \Psi)$
- le couple moyen est nul sauf si  $\Omega = \Omega_s$
- **$C_m = 3\phi_{max}I \times \cos(\Psi) = 3\phi_{max}I \times \sin(\xi)$**
- C'est la même situation que pour le moteur à courant continu ( la rotation en plus)
- **le moteur doit tourner à la vitesse de synchronisme**
- **Le couple est proportionnel au courant ( pour un moteur à excitation constante)**
- $-\frac{\pi}{2} < \Psi < \frac{\pi}{2}$  risque d'instabilité



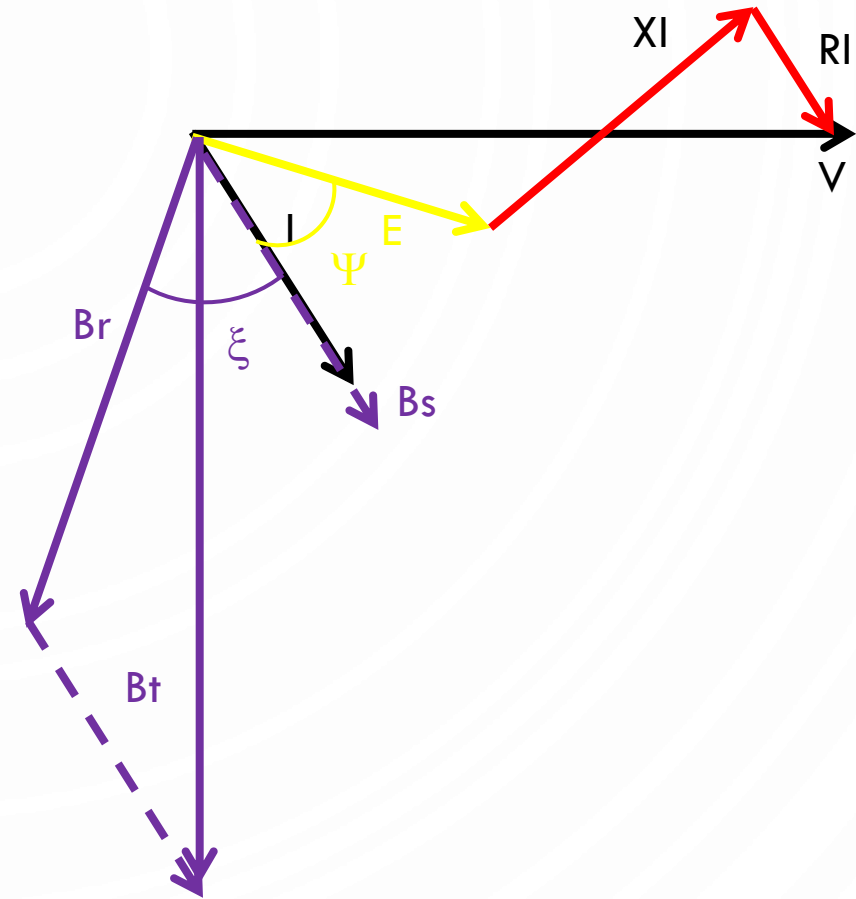
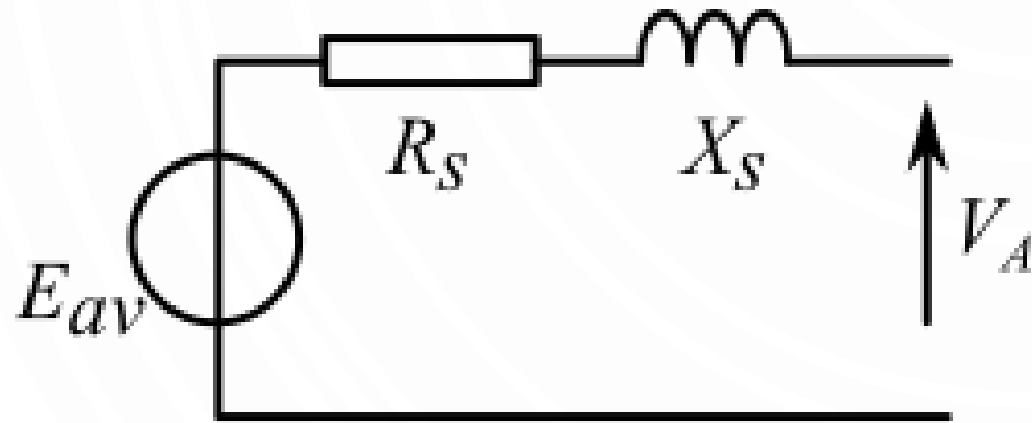


# MOTEUR SYNCHRONES : MODÈLE ÉLECTRIQUE

- Le rotor tourne, le flux du champ magnétique rotorique à travers le stator varie, il apparait une force contreélectromotrice  $E = \frac{d\varphi}{dt} = SB_r\Omega \sin(p(\Omega_s t - \theta - \Psi))$
- Il faut tenir compte de la résistance électrique des enroulements  $R$
- De l'inductance d'autoinduction  $L$

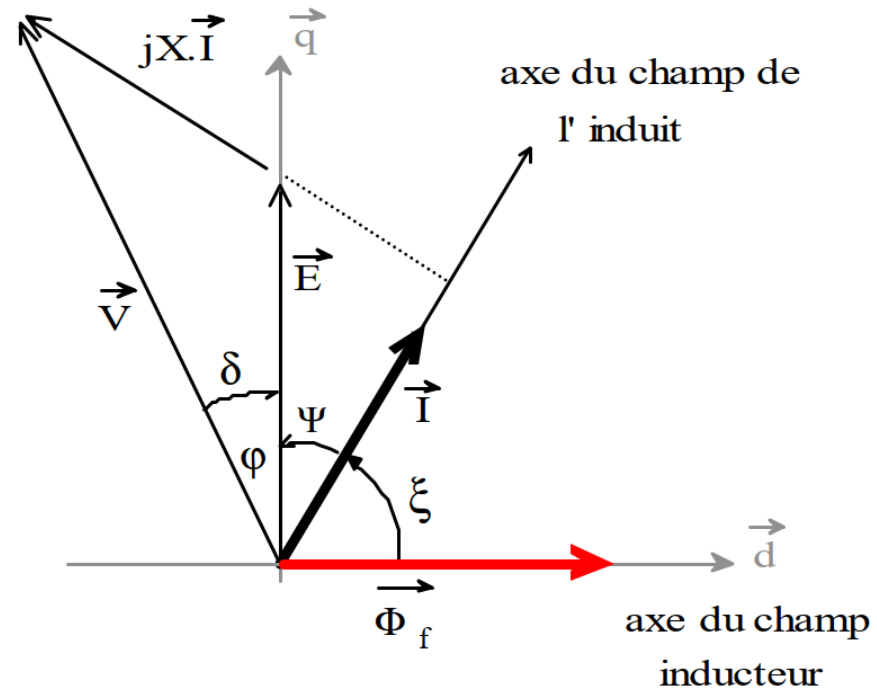
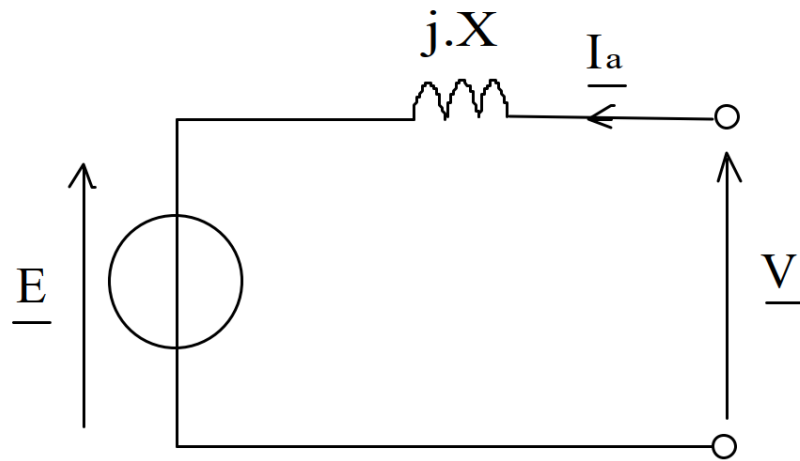


# MOTEUR SYNCHRONES : DIAGRAMME DE BEHN ESCHENBOURG

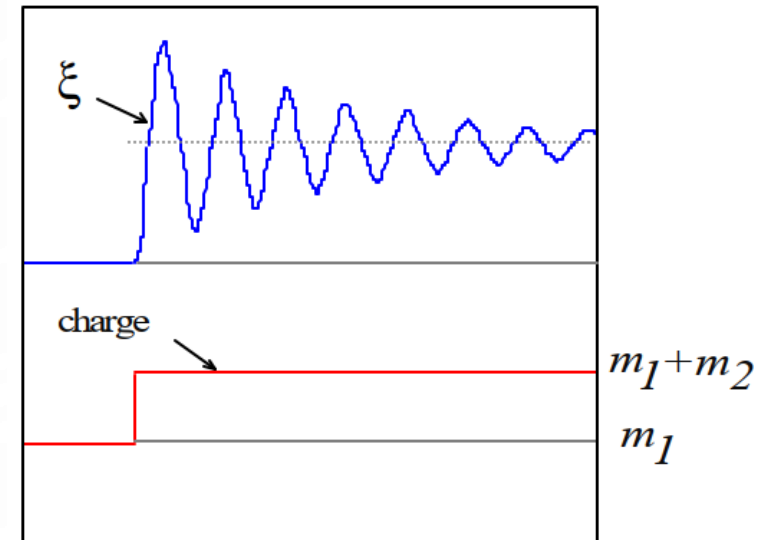
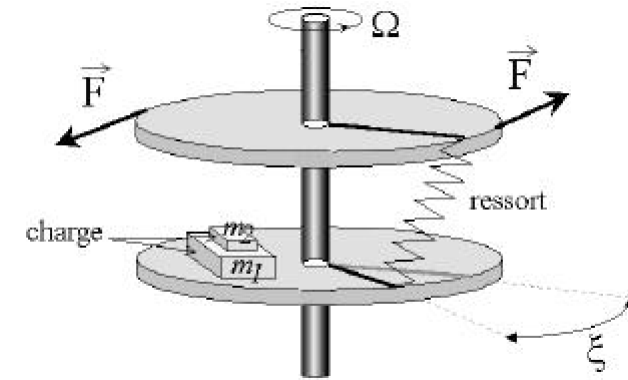


# MOTEUR SYNCHRONES : DIAGRAMME DE BEHN ESCHENBOURG SIMPLIFIÉ ( SANS PERTE JOULE)

$E$  : f.e.m. à vide,  
 $X = L\omega$  : réactance synchrone.



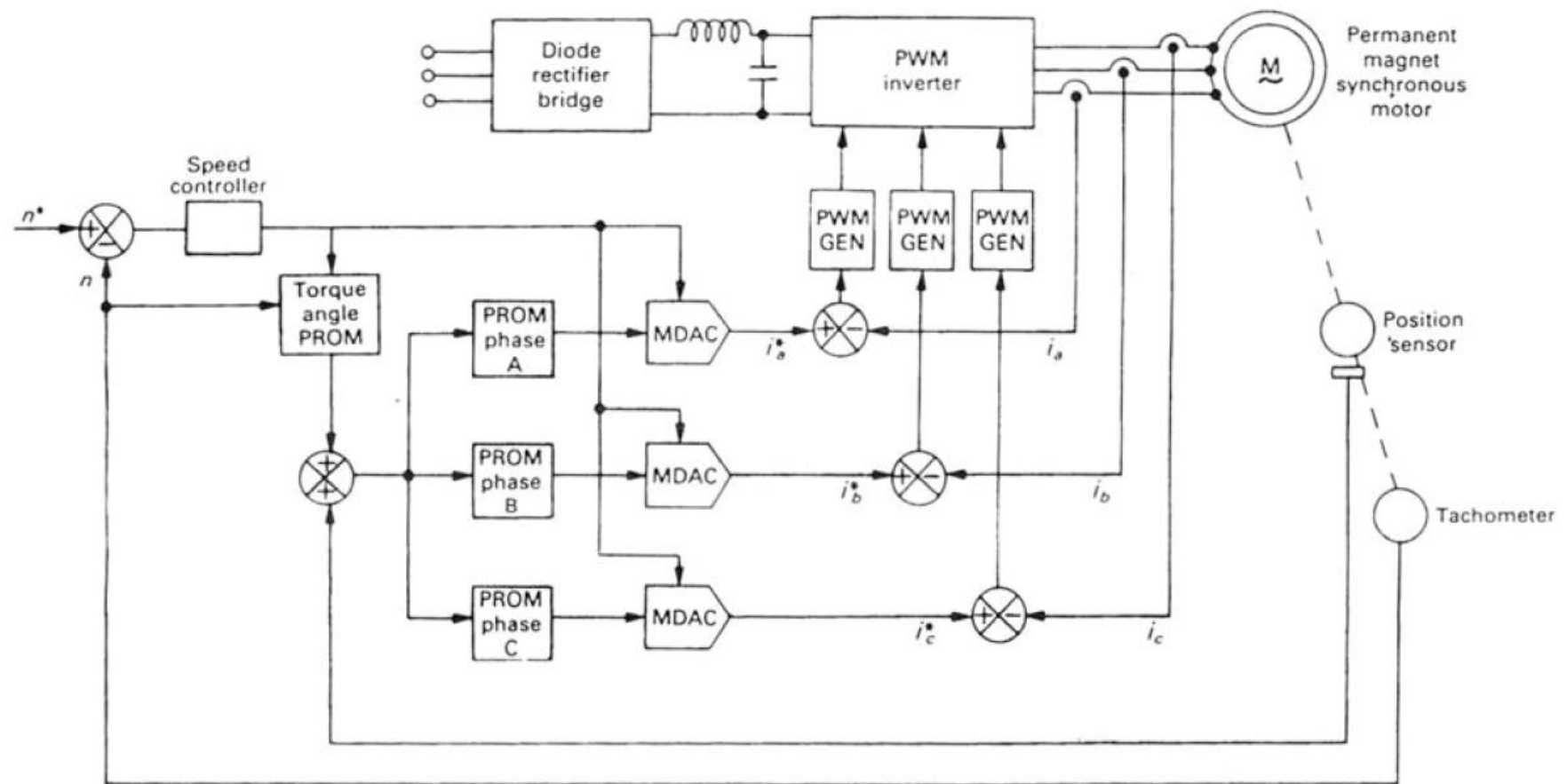
- On peut représenter le système :
- Plus la charge augmente, plus  $\xi$  augmente (sans dépasser  $\pi/2$ )
- Si la vitesse de rotation du champ statorique varie trop vite par rapport à la vitesse de rotation du rotor, il y a décrochage



# MOTEUR BRUSHLESS

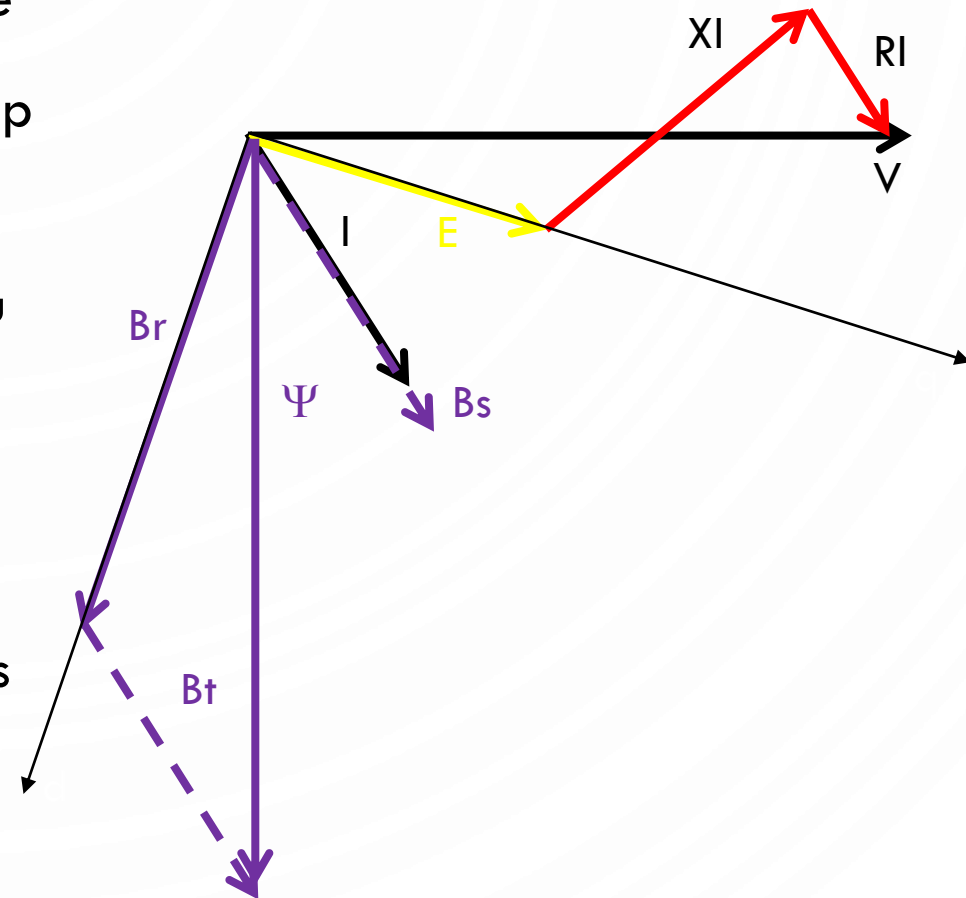
- Les moteurs brushless sont des moteurs synchrones autopilotés.
- Il existe deux types de pilotage
  - Sans capteur de position pour les vitesses importantes : la position du rotor est obtenue à partir de  $E = V - X_i$  . Cette méthode ne fonctionne pas à faible vitesse car il n'y a pas ou peu d'induction
  - Avec capteur de position ( codeur ou capteur à effet Hall) le système calcule l'intensité à envoyer dans chaque enroulement pour assurer le maintien du décalage

# ASSERVISSEMENT EN VITESSE ( BOUCLE TYPE ABC)

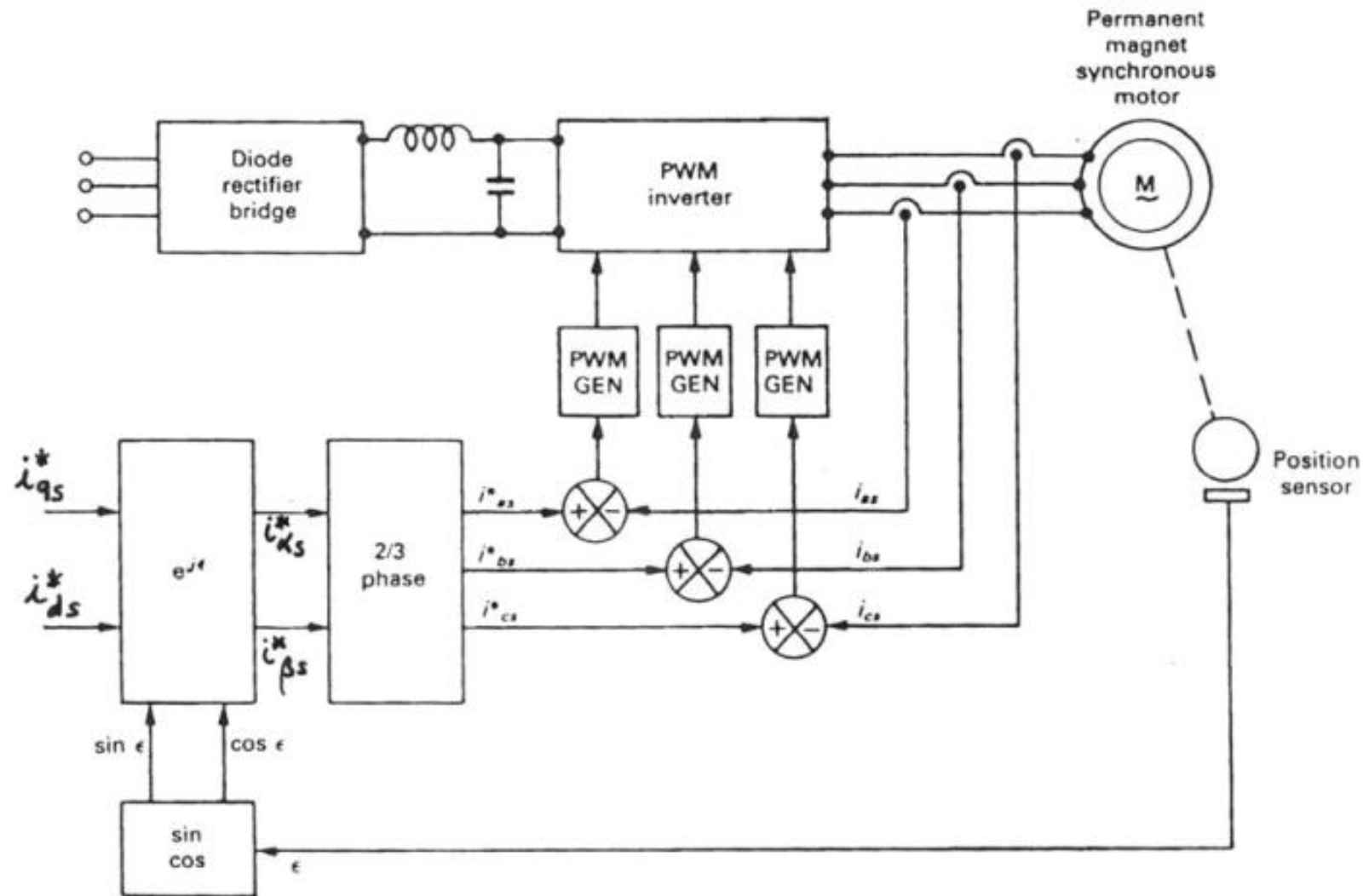


# CONTRÔLE VECTORIEL

- Changement de référentiel : les champs ne sont plus repérés dans le référentiel statorique mais dans le référentiel rotorique
- un axe « d » est colinéaire à l'axe du champ rotorique
- un axe « q » est perpendiculaire à l'axe du champ rotorique
- Intérêt dans ce référentiel les champs sont immobiles la machine est pilotée comme un moteur à courant continu avec des consignes continues



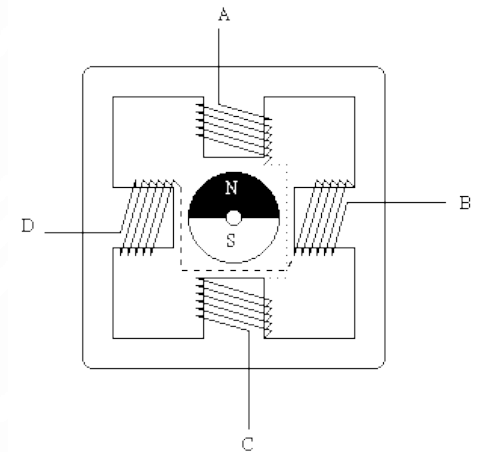
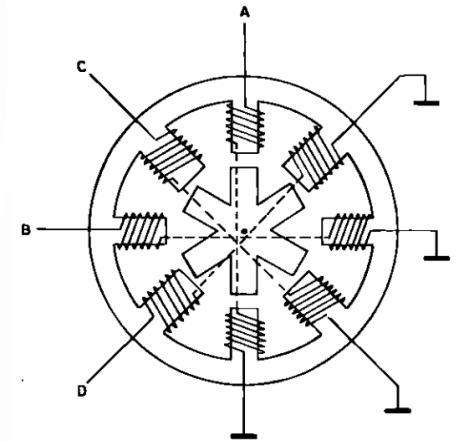
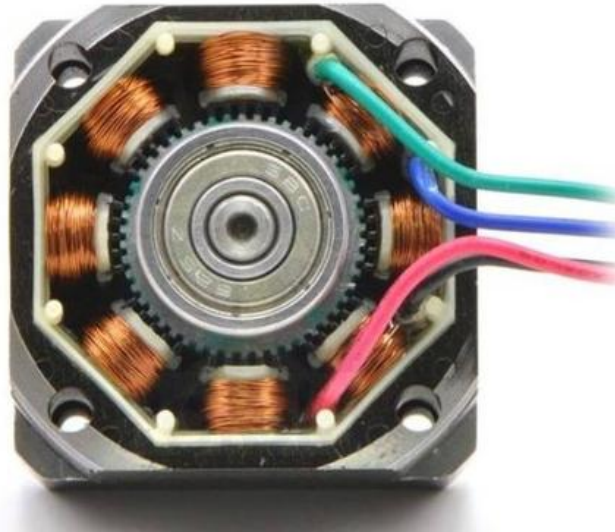
# CONTRÔLE VECTORIEL





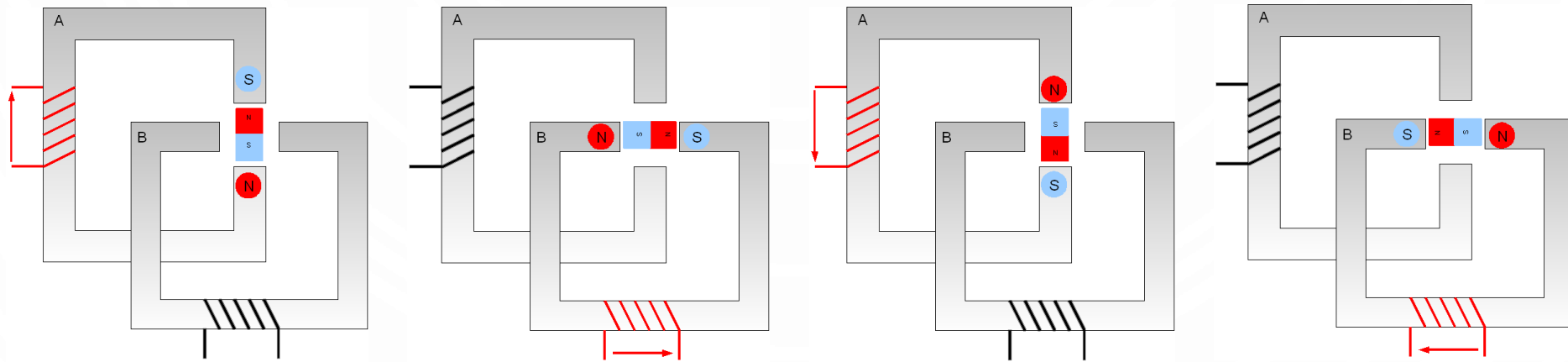
# MOTEUR PAS À PAS : CONSTITUTION

- Moteur unipolaire ( s'alimente avec un courant de même signe)
- Moteur bipolaire ( s'alimente avec un courant de signe différents)
- Le nombre de « dents » définit le nombre de pas



# MOTEUR PAS À PAS FONCTIONNEMENT

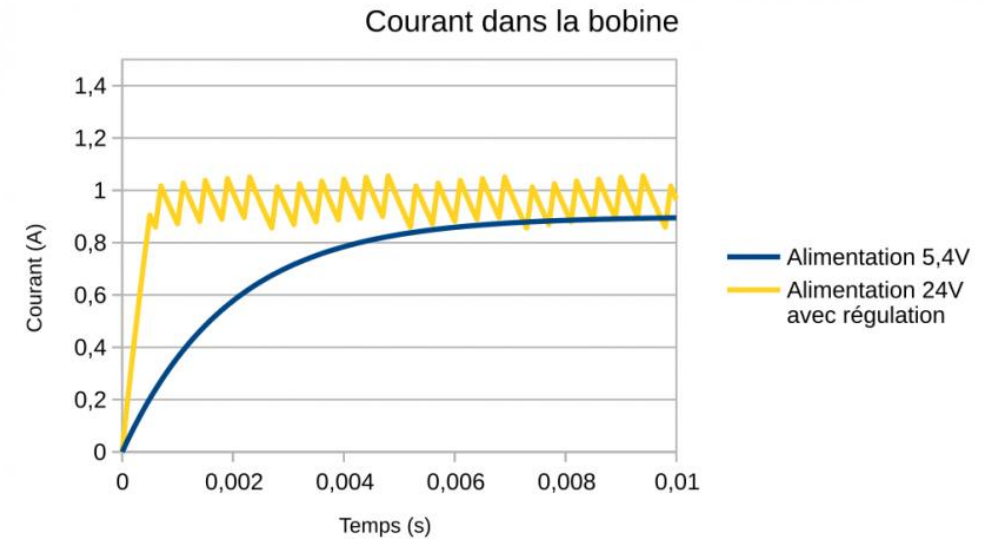
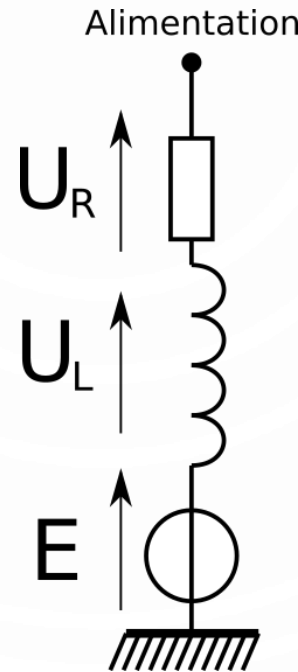
- Il existe beaucoup de stratégies de pilotage :
- Exemple commande en pas entier



- Commande à couple max, commande en  $\frac{1}{2}$  pas...

# MOTEUR PAS À PAS MODÉLISATION

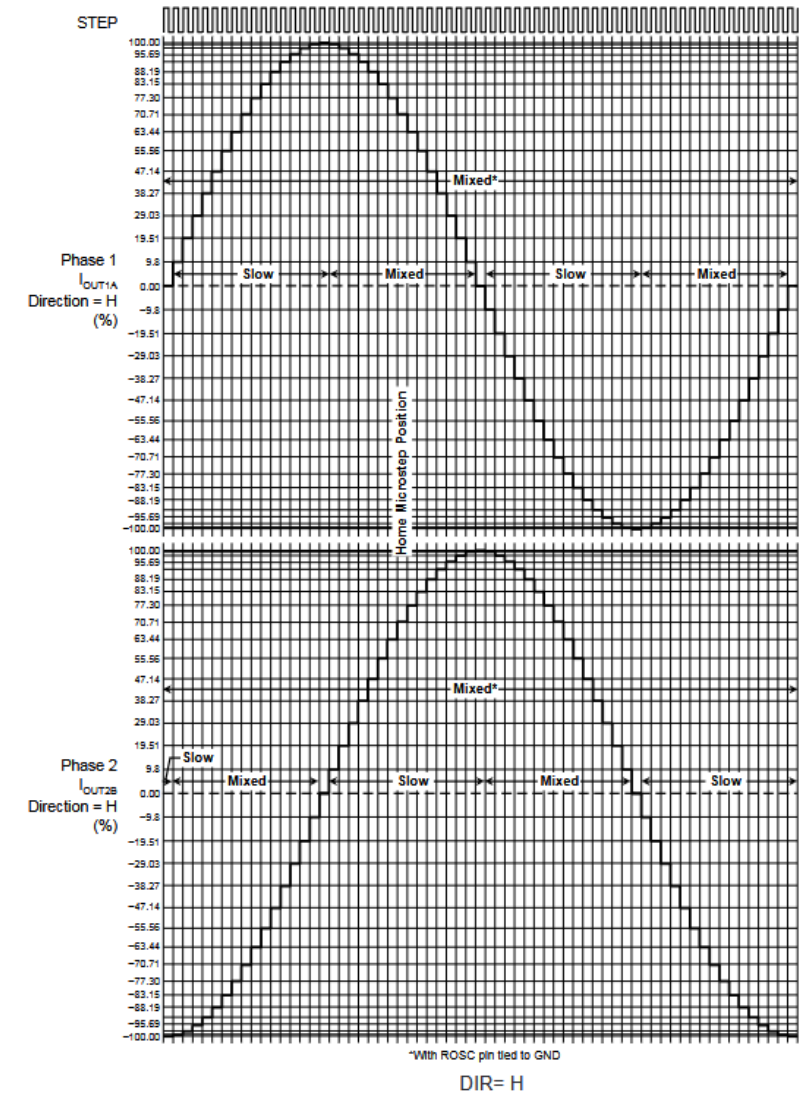
- Comme pour un moteur synchrone la modélisation électrique est
- La résistance de l'enroulement  $R$
- L'inductance d'auto induction  $L$
- Si la vitesse est importante une force électromotrice  $E$



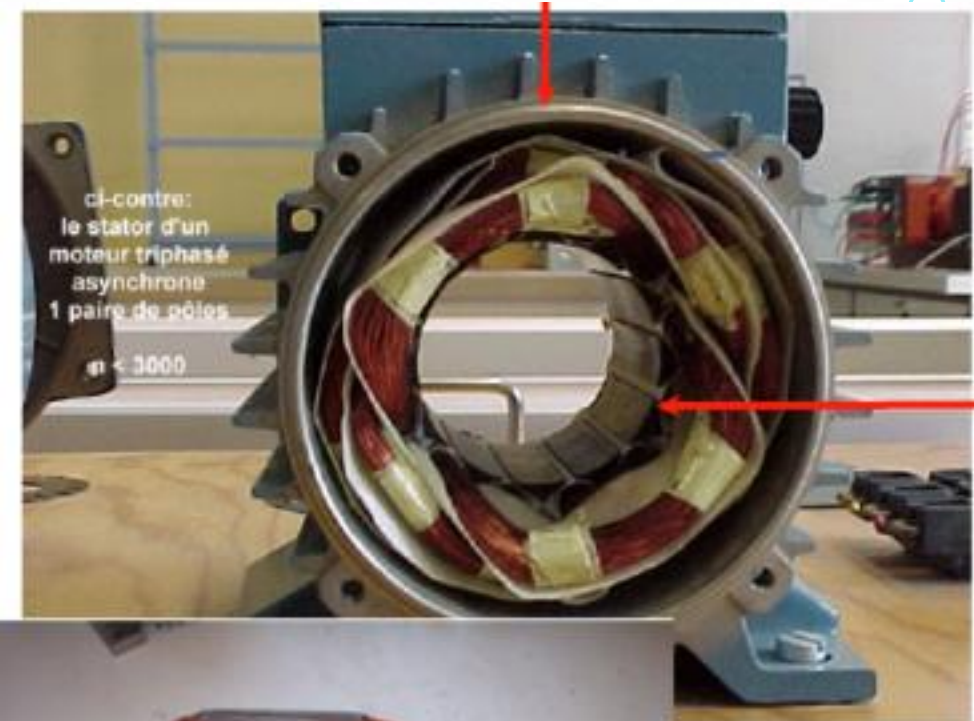
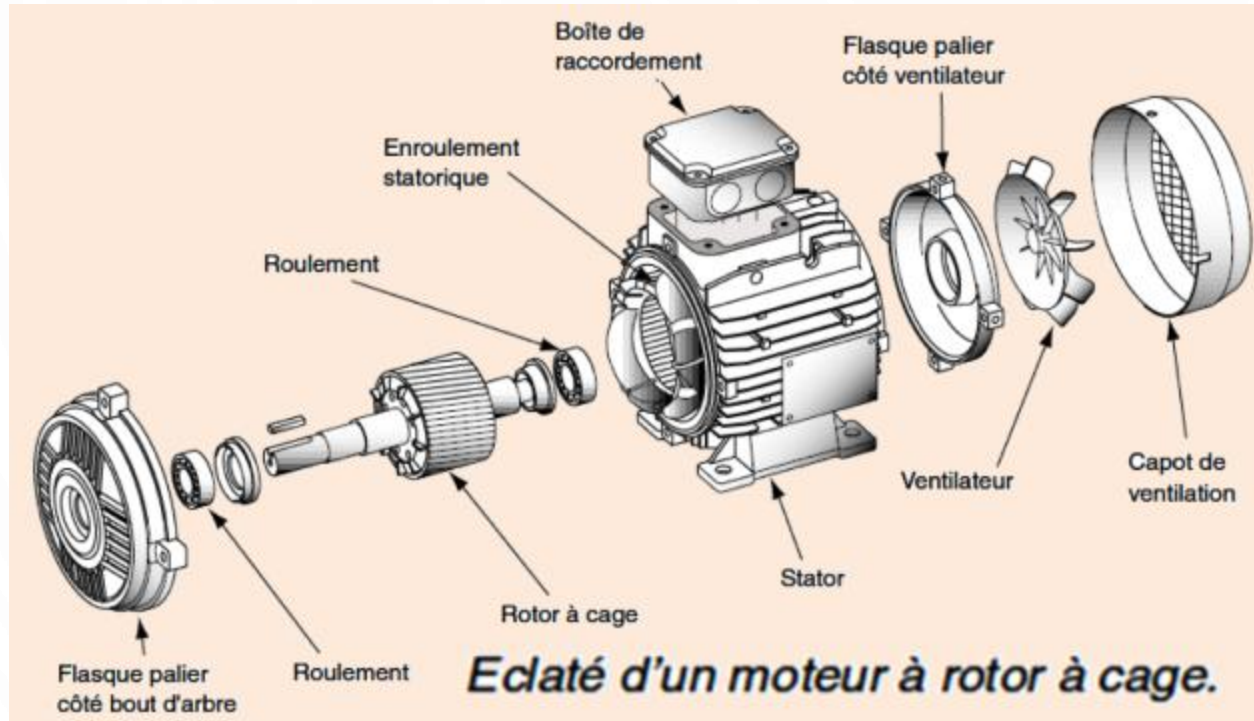
- La constante de temps  $R/L$  limite le temps d'apparition du courant dans l'enroulement et diminue le couple moyen
- Une régulation en courant améliore les performances du moteur

## A4988

## DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

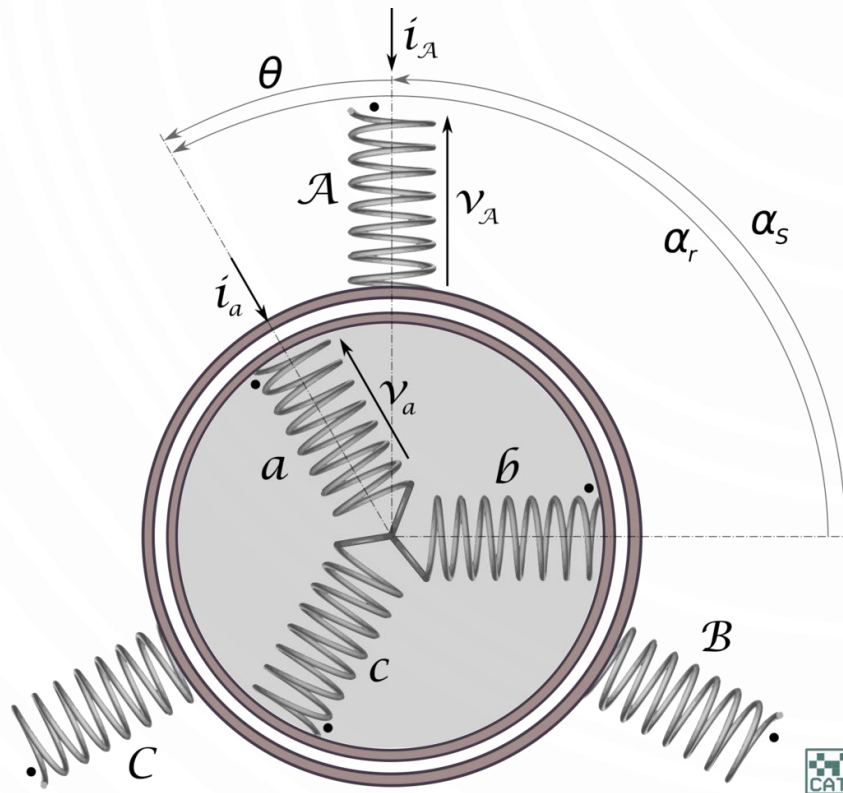


# MOTEUR ASYNCHRONE : CONSTITUTION



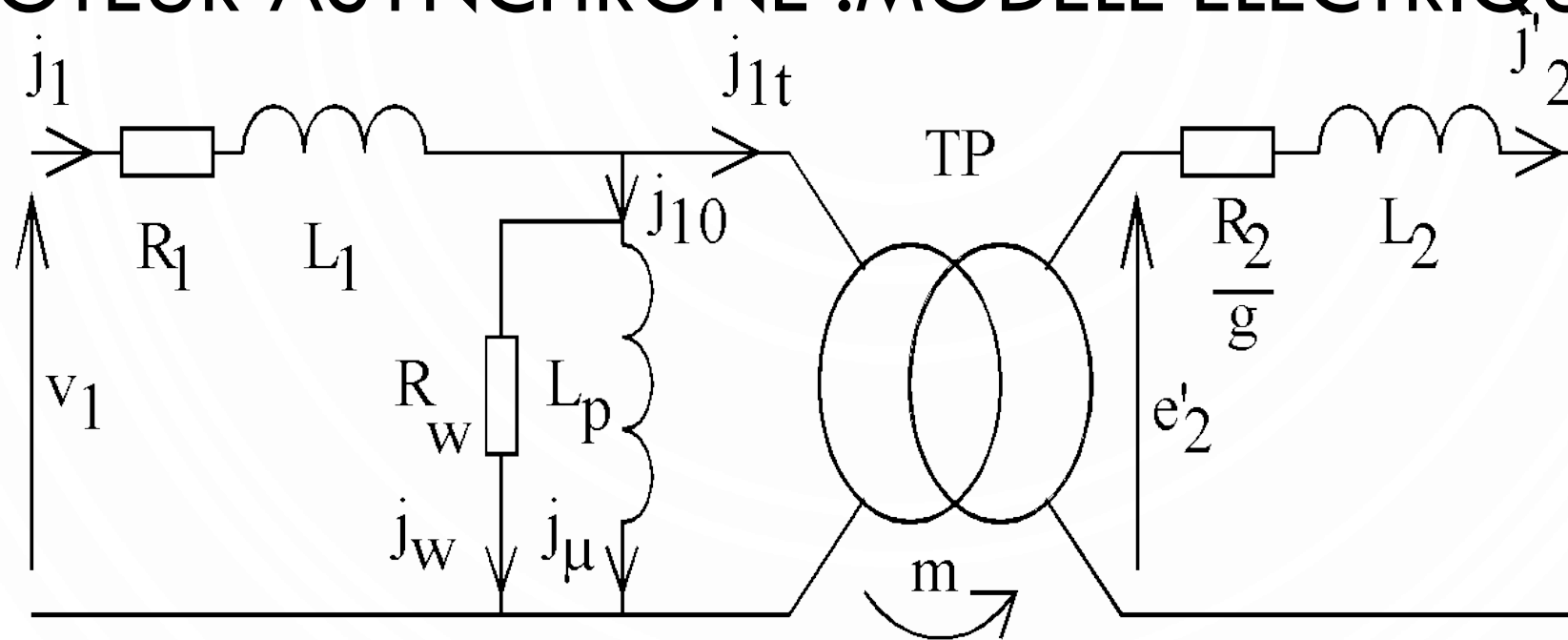


# MOTEUR ASYNCHRONES FONCTIONNEMENT



- Le stator du moteur asynchrone est identique à celui du moteur synchrone
- Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant ( Ferris)  $\Omega_s$
- Le rotor tourne à une vitesse différente du champ statorique  $\Omega$
- Il apparait dans les enroulements ( ou dans la cage) des courants induits d'où le nom de moteur à induction
- On définit le glissement  $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$
- Les courants dans le rotor ont pour pulsation  $\omega_r = \omega_s - \omega = g\omega_s$
- Le système se comporte électriquement comme un transformateur triphasé avec le secondaire en mouvement

# MOTEUR ASYNCHRONE : MODÈLE ÉLECTRIQUE

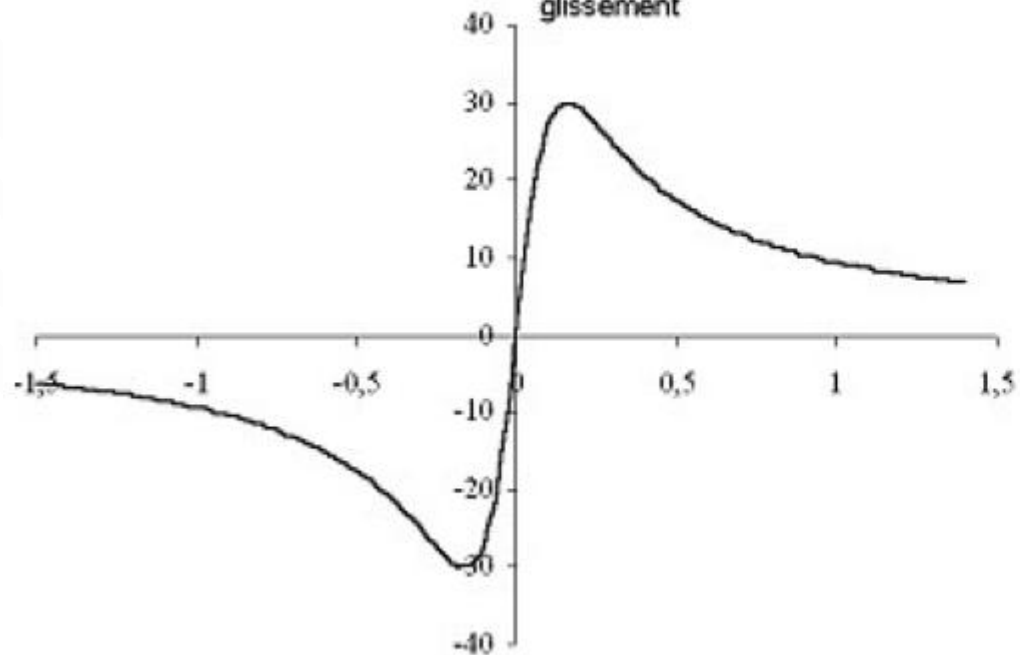


- Le transformateur crée des courants de pulsation  $g\omega$  avec un rapport de transformation  $m$  pour les tensions et  $g_m$  pour les courants.
- On retrouve le modèle d'un transformateur en divisant toutes les grandeurs du secondaire par  $g$

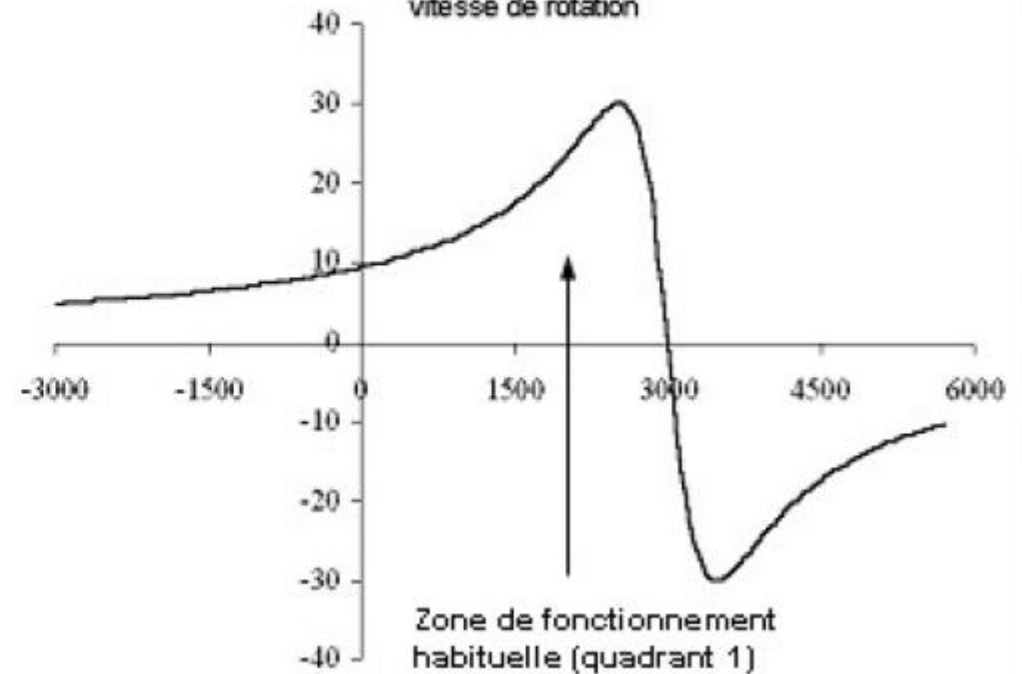
# MOTEUR ASYNCHRONE : COUPLE/VITESSE

- $C_m = \frac{P_2}{\Omega}$  le couple est la puissance du secondaire sur la vitesse angulaire
- $C_m = \frac{3p(mV_1)^2}{\omega_s} \frac{gR_2}{R_2^2 + (L_2 g \omega_s)^2}$

Couple moteur d'une machine asynchrone en fonction du glissement



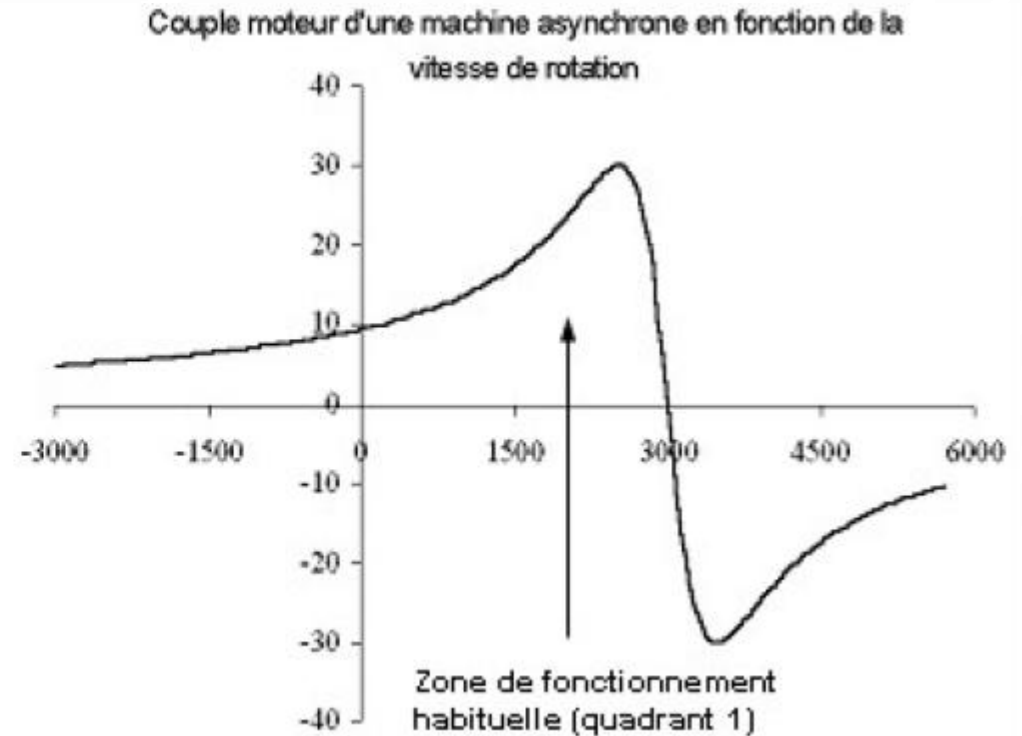
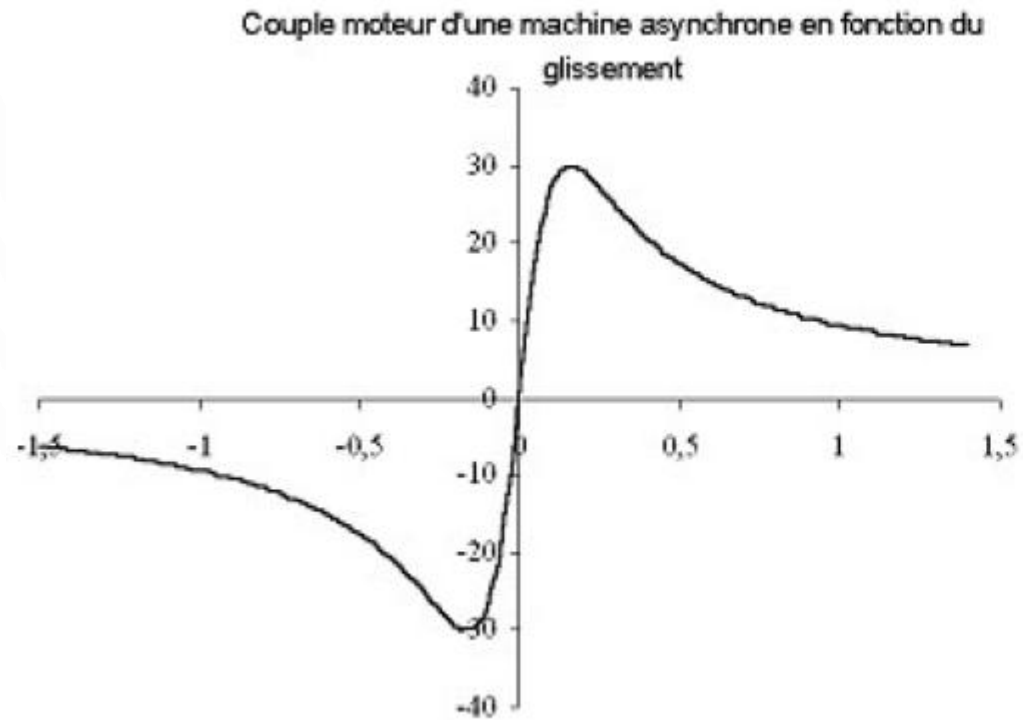
Couple moteur d'une machine asynchrone en fonction de la vitesse de rotation





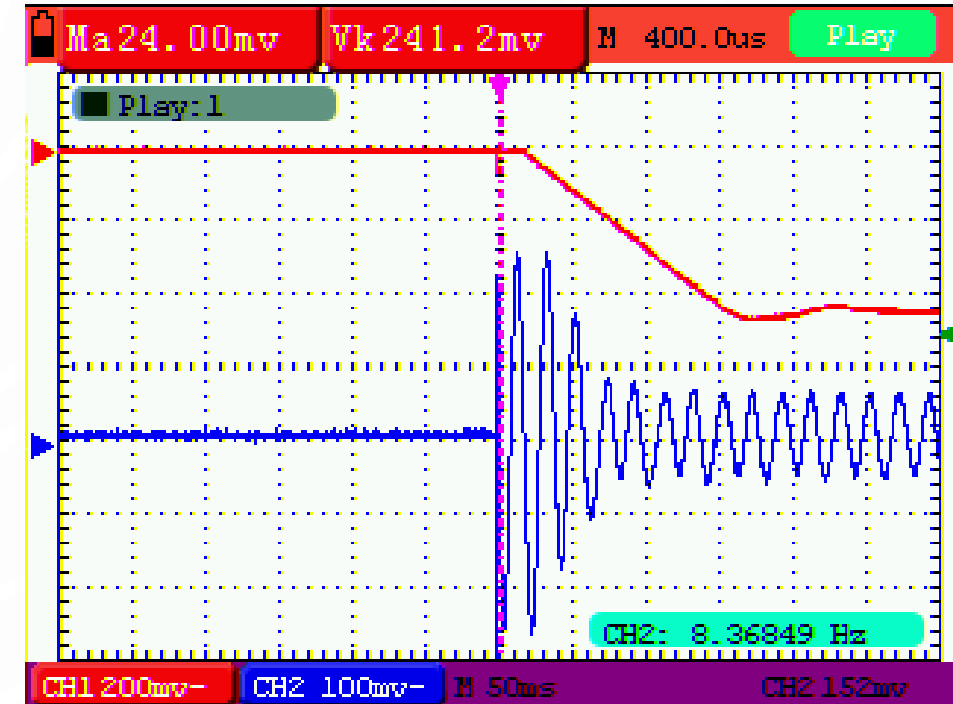
# MOTEUR ASYNCHRONE : COUPLE/VITESSE

- Le couple de démarrage est non nul  $C_d = \frac{3p(mV_1)^2}{\omega_s} \frac{R_2}{R_2^2 + (L_2\omega_s)^2}$
- Pour des glissements faibles  $C_m = \frac{3p(mV_1)^2}{\omega_s} \frac{g}{R_2}$  est proportionnel au glissement



# MOTEUR ASYNCHRONE DÉMARRAGE

- Le courant de démarrage direct est très important ( $g=1$ ) est peut aller jusqu'à 7 fois le courant nominal
- Utilisation d'une tension réduite au démarrage (mais couple plus faible)
- Utilisation d'une rampe de démarrage avec un variateur



# MOTEUR ASYNCHRONE : ASSERVISSEMENT DE VITESSE

- Une boucle de couple qui asservie le glissement
- Une boucle de vitesse
- Fonctionne mal pour l'asservissement de position car fréquence trop faible

