

# Ch5. Machines électriques



The background is a deep blue gradient with several translucent, flowing, curved lines that create a sense of motion and depth. These lines are rendered with a slight blur and a gradient from light to dark blue, giving them a liquid or ethereal appearance. They curve and overlap, creating a dynamic and modern aesthetic.

# ***1. Introduction***

# 1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Les machines électriques possèdent un fonctionnement réversible. Nous parlons de **moteur** pour une conversion électrique/mécanique et d'**alternateur** ou de **générateur** pour une conversion mécanique/électrique. Nous avons pu le voir durant l'introduction à cet enseignement, les deux familles de machines les plus rencontrées en moyennes et fortes puissances sont :

- **Machines Synchrones (MS)**
  
- **Machines Asynchrones (MAS)**

# 1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En 2010, les entraînements électriques représentent 70% de la consommation d'électricité industrielle mondiale (source AIE). Prenons quelques exemples d'applications des machines:

AGV de Alstom  
(MS à aimants)



Compresseur Dixair  
(MAS à cage)



Queen Mary 2  
(MS à rotors bobinés - propulsion)



5M de RePower  
(MAS à rotor bobiné - fonctionnement MADA)



PRIUS de Toyota  
(MS à aimants)



... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En 2010, **Jeumont Electric** est un des leader mondiaux dans les domaines des machines synchrones à aimants appliquées notamment à la production et aux applications marines (militaire et marchande) :



En 2010, Jeumont Electric est notamment le fabricant référence des machines rencontrées dans les motopompes du circuit primaire des centrales nucléaires fabriquées par AREVA.

# 1. Introduction

Observons rapidement de quoi est constituée une machine électrique :

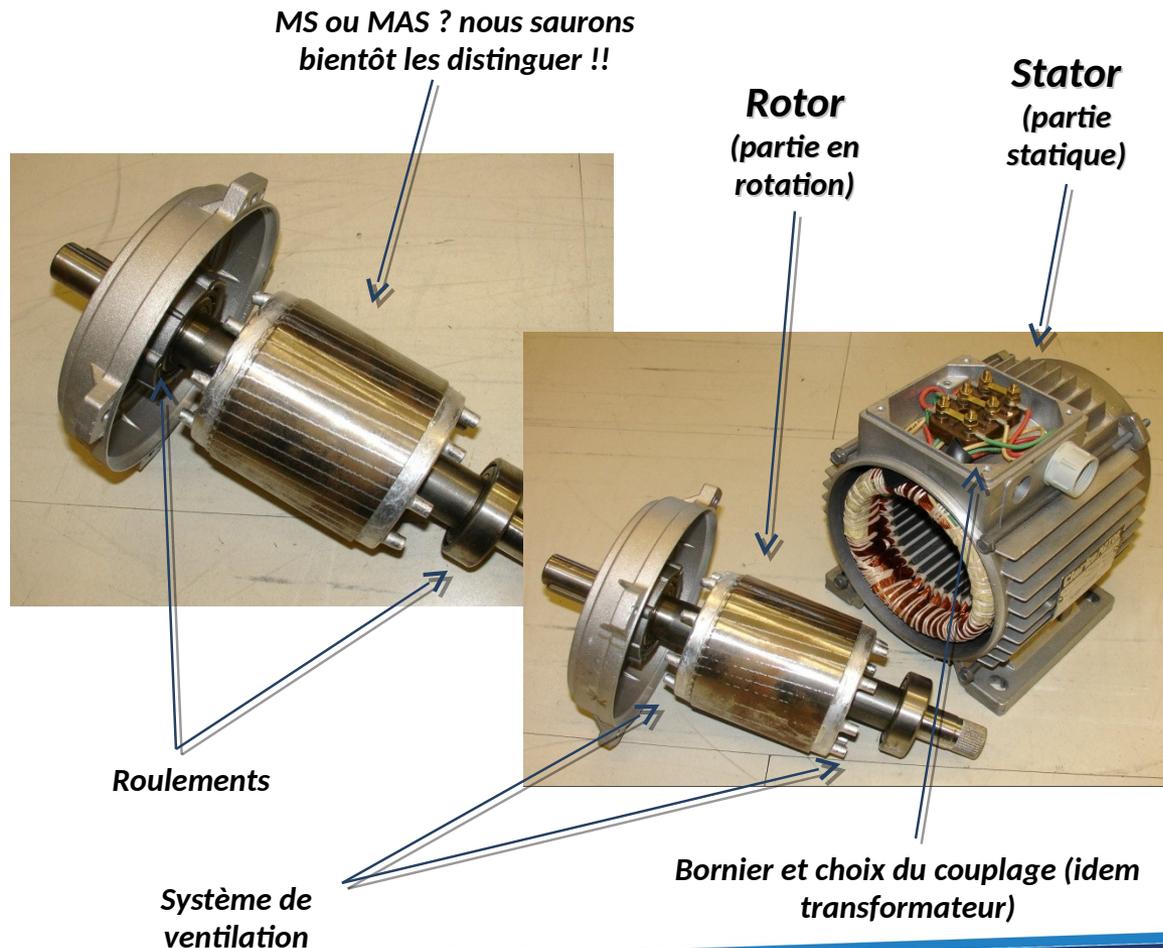
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



# 1. Introduction - Stator

... à la découverte des machines électriques

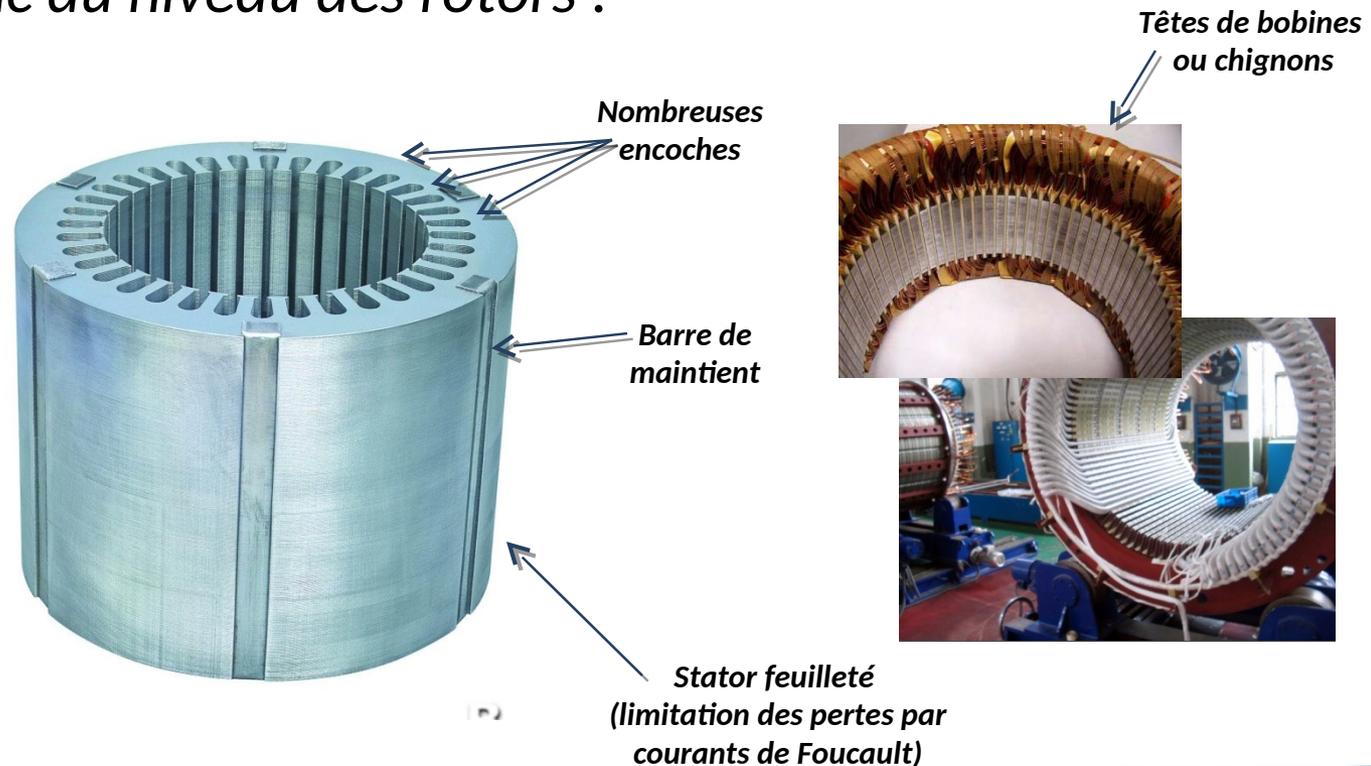
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

A puissance, tensions, courants, nombre de paires de pôles, dimensions, géométries ... équivalents, les **MS et MAS possèdent le même stator**. Les différences entre ces deux familles de machines se font donc au niveau des rotors :



# 1. Introduction – Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

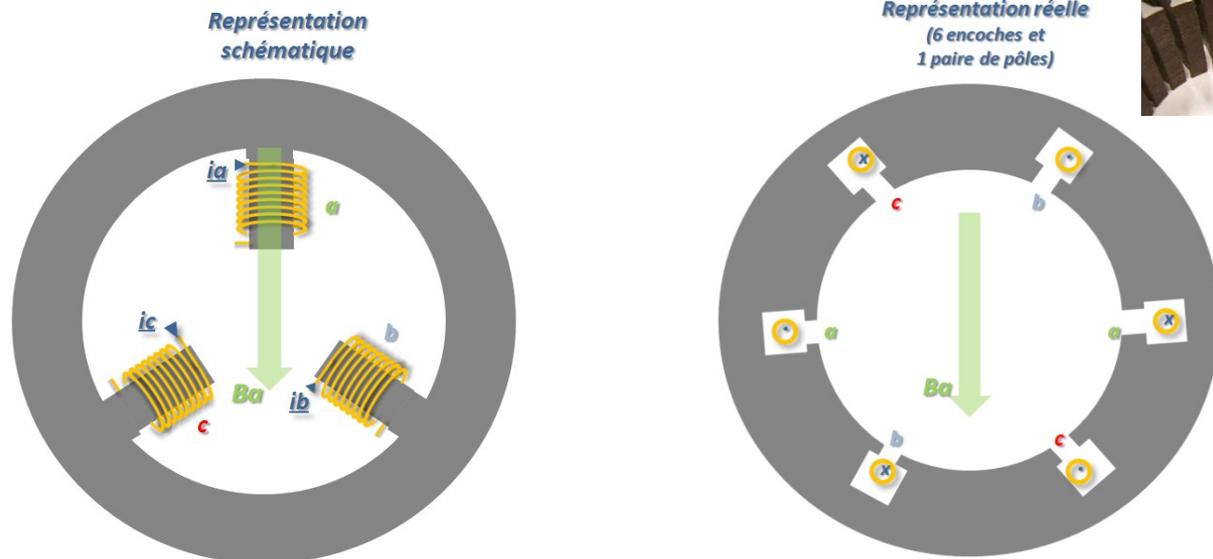
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En fonctionnement moteur pour une machine triphasée, le rôle du stator est de **générer un champ magnétique tournant** à partir d'un système triphasé de courants. Ce fonctionnement est réversible en fonctionnement alternateur (du champ tournant vers le système triphasé de courants) :



# 1. Introduction – Champ tournant

Observons comment nous pouvons faire tourner un champ magnétique dans une machine électrique :

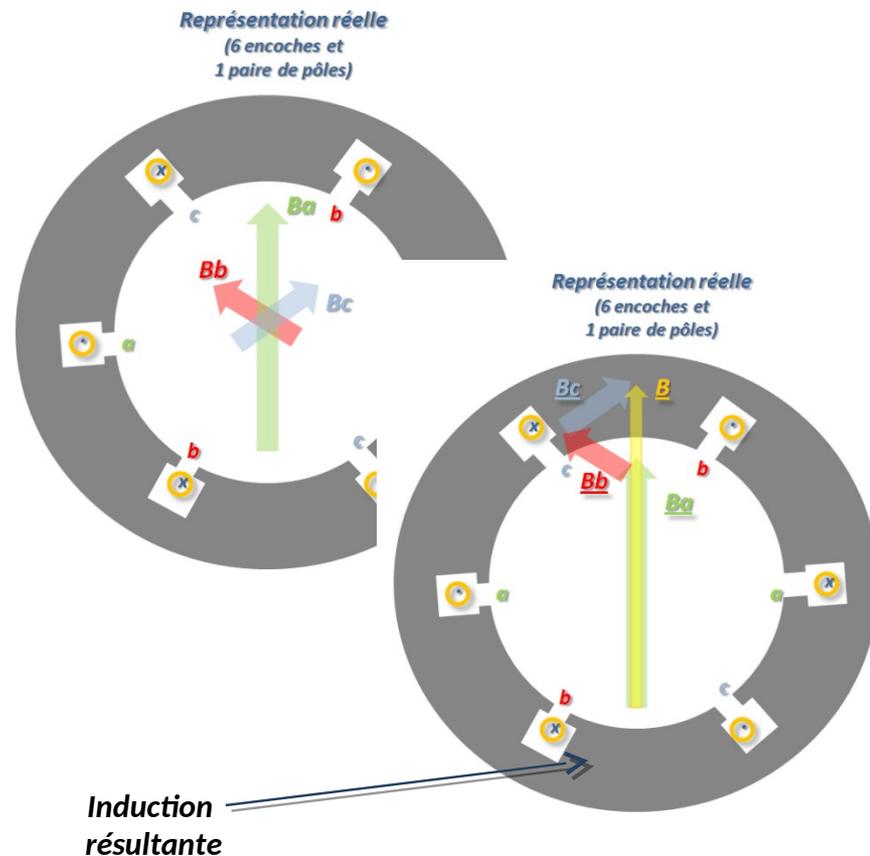
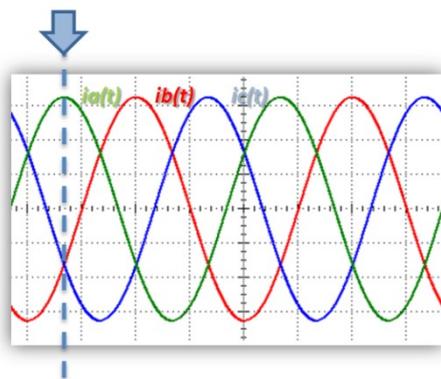
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



# 1. Introduction – Champ tournant

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

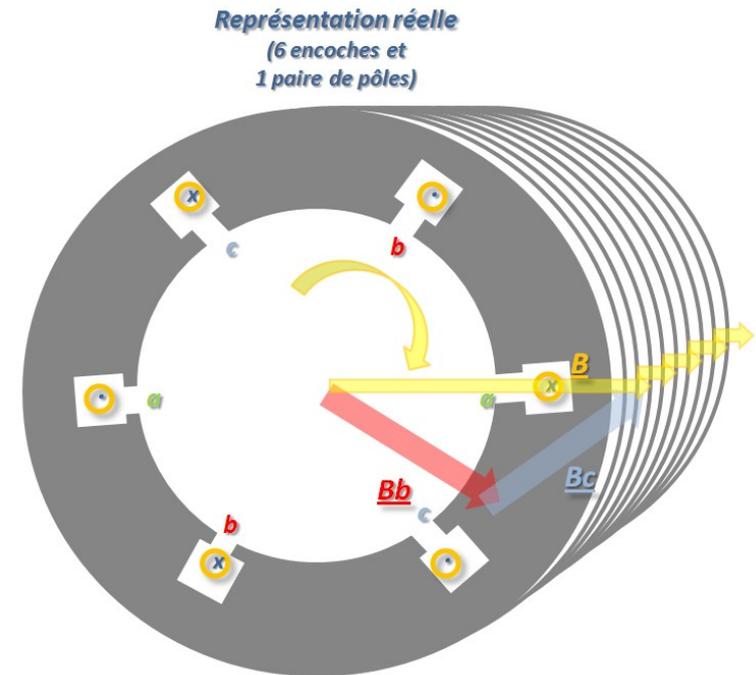
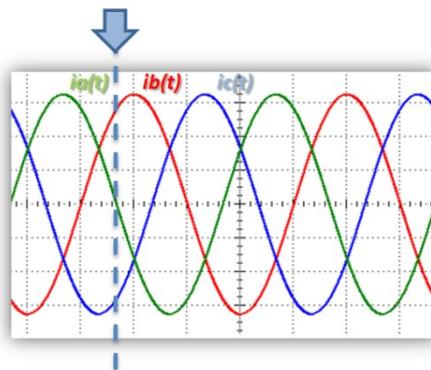
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



# 1. Introduction – Champ tournant

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

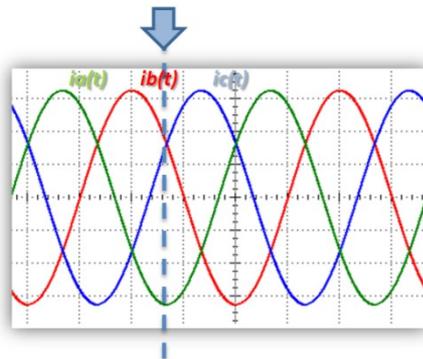
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

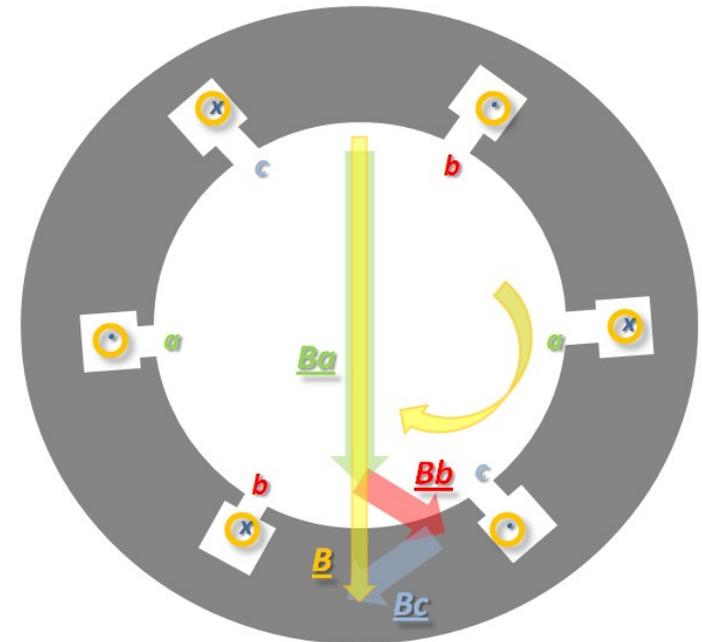
- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



Représentation réelle  
(6 encoches et 1 paire de pôles)



# 1. Introduction – Champ tournant

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

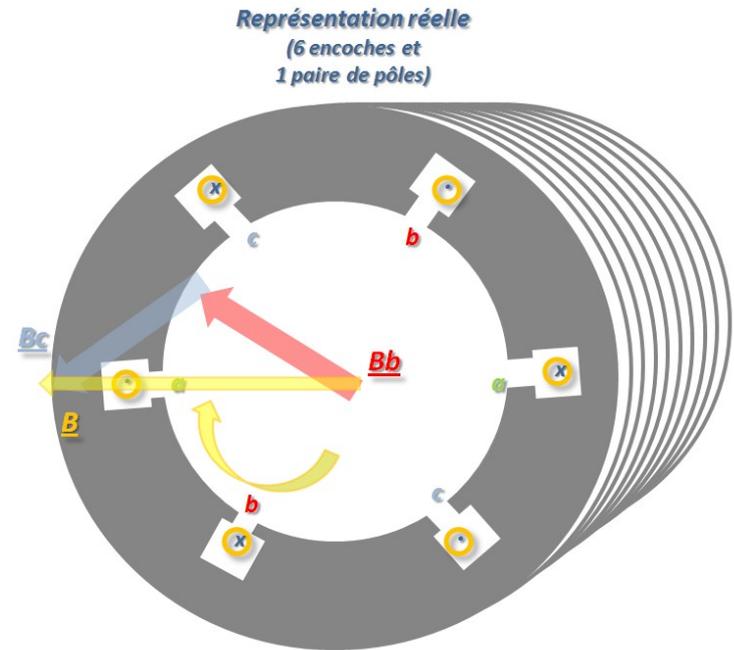
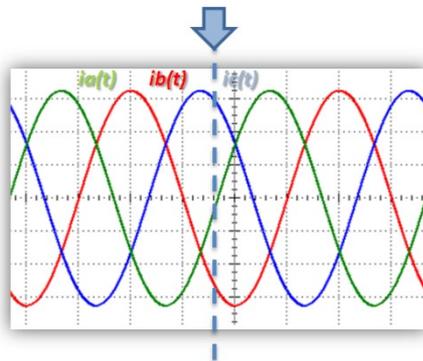
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



Découvrons les principes de fonctionnement des machines synchrones et asynchrones :

... à la découverte des machines électriques

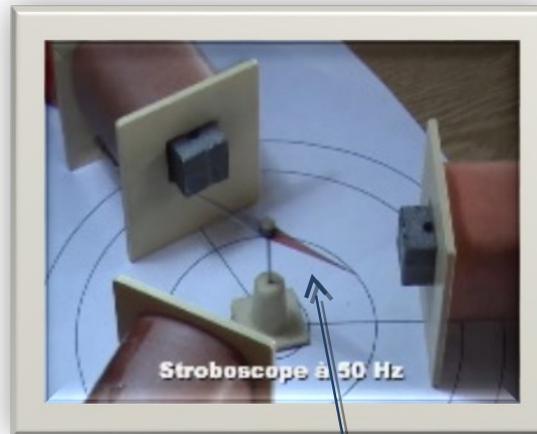
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

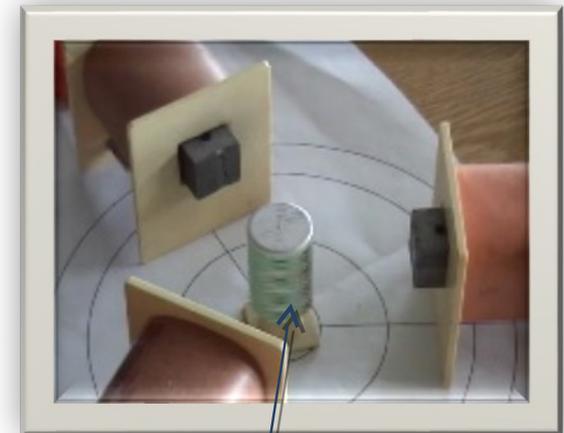
3. Machines synchrones

Principe de fonctionnement de la machine synchrone (MS)



Aiguille de boussole  
(rotor constitué d'aimants  
ou d'électro-aimants)

Principe de fonctionnement de la machine asynchrone (MAS)



Boîte en fer blanc d'aspirine

Découvrons les principes de fonctionnement des machines synchrones et asynchrones :

... à la découverte des machines électriques

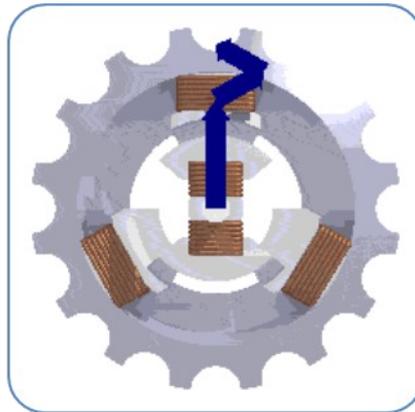
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

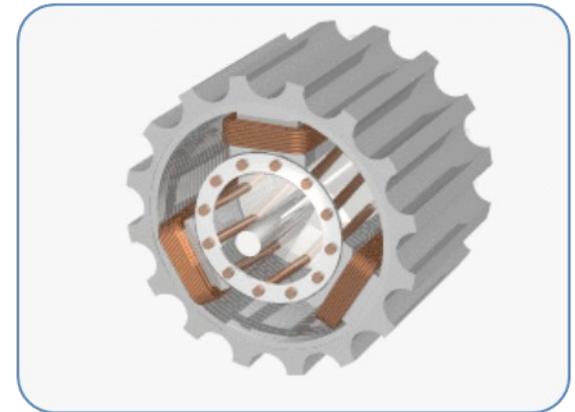
2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Principe de fonctionnement de la machine synchrone (MS)



Principe de fonctionnement de la machine asynchrone (MAS)



... à la découverte des machines électriques

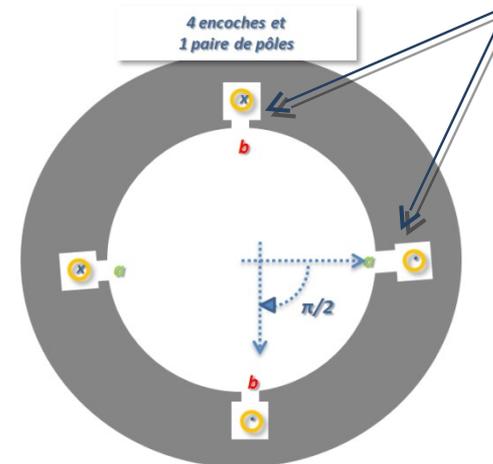
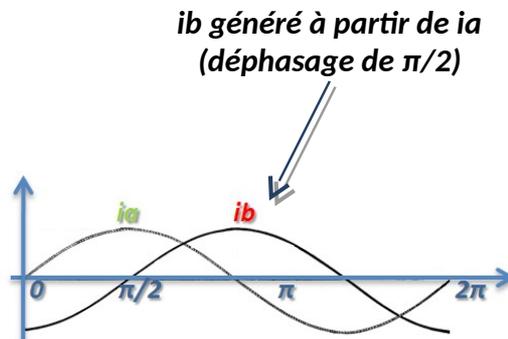
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

La règle à suivre afin de générer un champ magnétique tournant est d'assurer un déphasage angulaire des courants égal au déphasage spatial des enroulements (Théorème de Ferraris). Les machines asynchrones monophasés sont en fait des **machines biphasés** (machines à laver, compresseurs ...) :



Les machines asynchrones monophasés utilisent en général des techniques moins coûteuses pour le déphasage spatial des enroulements (spires de Frager ...)

# 1. Introduction – Champ tournant

En rajoutant des **paires de pôles** nous pouvons diminuer la vitesse de rotation du champ tournant à fréquence de travail donnée (principe réversible en génératrice). Systèmes à faible vitesse (éoliennes, marine-POD ...). Nous pouvons écrire :

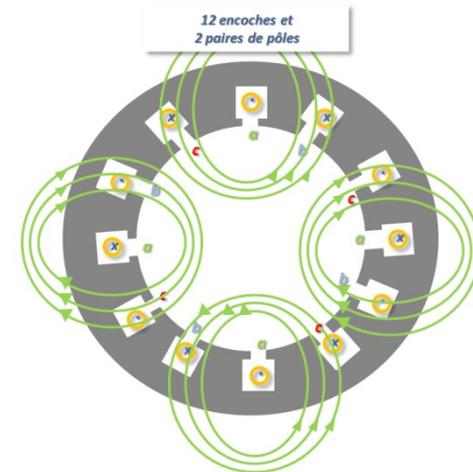
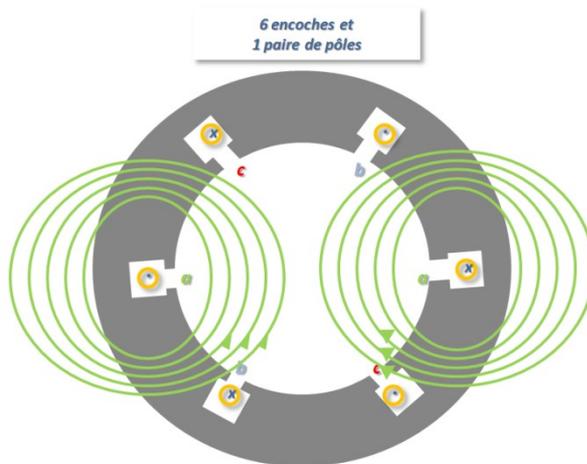
$$\Omega_s = \omega_s / p = 2\pi \cdot N_s / 60$$

Vitesse de rotation du champ magnétique en rad/s

Pulsation courants statoriques en rad/s

Nombre de paires de pôles

Vitesse de rotation du champ magnétique en tr/mn



... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

... à la découverte des machines électriques

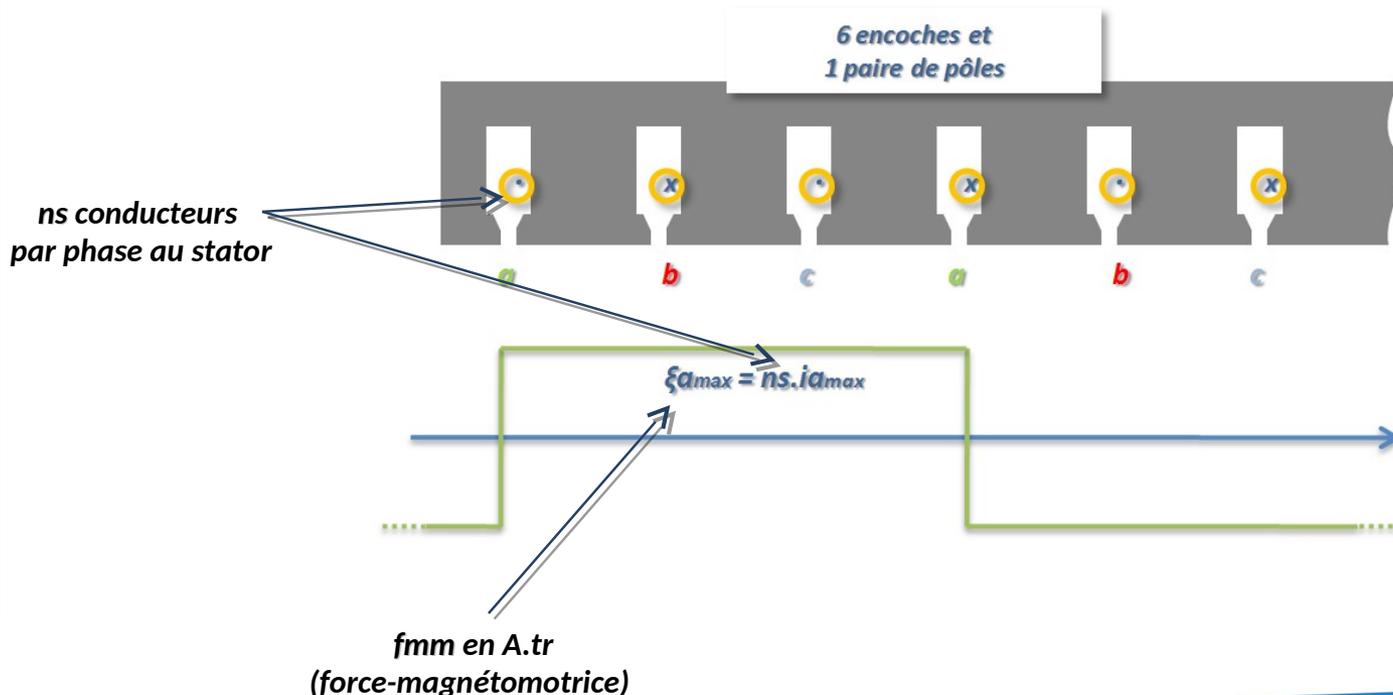
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Les astuces technologiques sont principalement là pour générer une **fmm** (force-magnétomotrice) et donc une excitation magnétique la plus sinusoïdale possible (atténuation des ondulations de couple - usures mécaniques) :



Une première solution consiste à distribuer les enroulement sur plusieurs encoches :

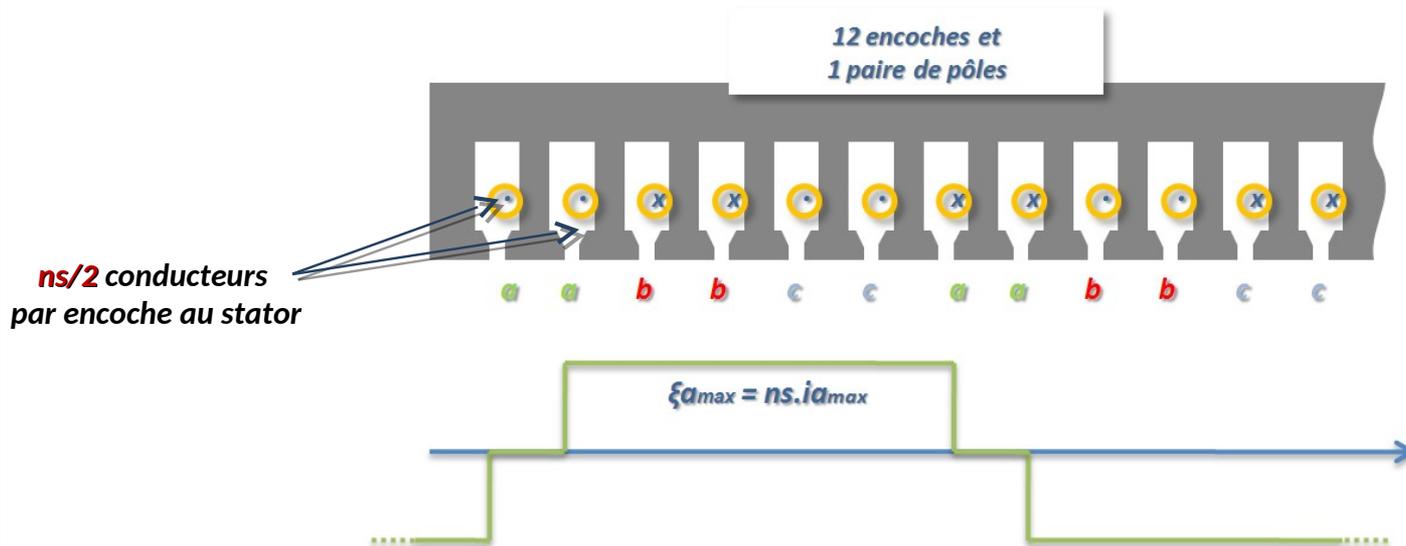
... à la découverte des machines électriques

## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones



## Les autres solutions, souvent en sus de la précédente :

... à la découverte des machines électriques

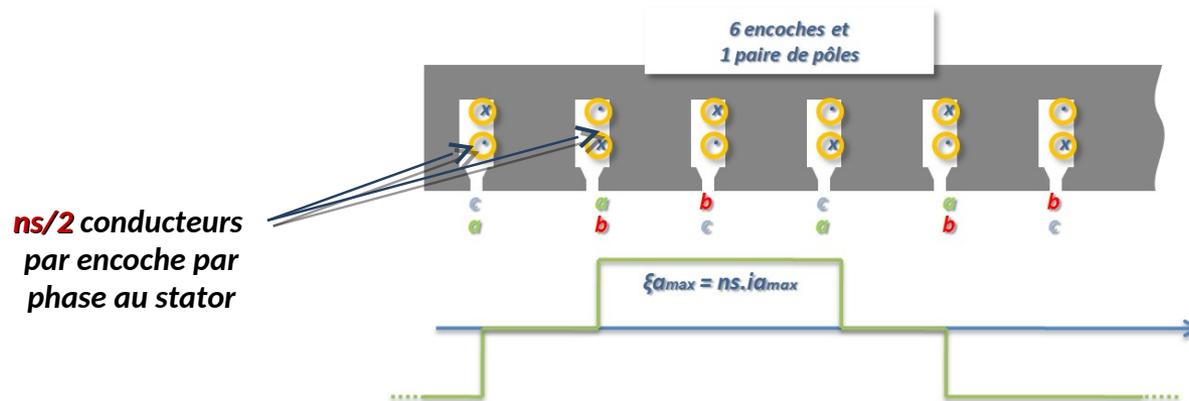
### 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

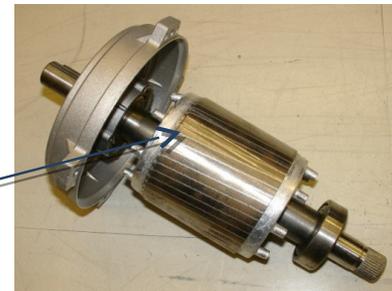
3. Machines synchrones

### • Raccourcissement



- Inclinaison des encoches au rotor pour MAS. Limitation ondulations de couple (usure mécanique)

Inclinaison d'un pas d'encoche



... à la découverte des machines électriques

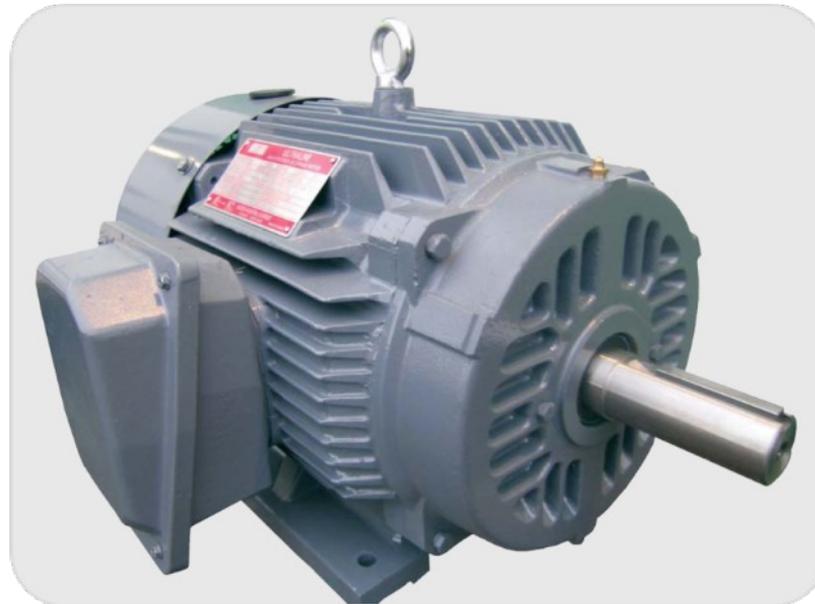
## 1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Regardons un film sur la conception des machines électriques (Comment c'est fait ? - JRP) :



<https://www.youtube.com/watch?v=iP1rNnQ3Aow>

The background is a deep blue color with several flowing, ribbon-like shapes in lighter shades of blue and white. These shapes curve and overlap, creating a sense of motion and depth. The text is centered in the middle of the frame.

## *2. Machines Asynchrones*

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

## Machine Asynchrone



<https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28>

## 2. Machines Asynchrones

### ... à la découverte des machines électriques

#### 1. Introduction

#### 2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

#### 3. Machines synchrones

Les distinctions entre les machines synchrones et asynchrones se font au niveau de leurs rotors. Rotor et stator possèdent le même nombre de paires de pôles. Il existe deux grandes techniques de conception des rotors pour les machines asynchrones :

- **Rotor à cage** (ou cage d'écureuil). De très loin les machines asynchrones les plus rencontrées (machines à laver, compresseurs, ventilateurs, pompes, mélangeurs ...). **Très faible coût** lié à la technique de conception du rotor.
- **Rotor bobiné** (rotor à bagues). Machines très coûteuses plus rarement rencontrées. Application typique à la production en fortes puissances en fonctionnement MADA (éoliennes ...)

Les **MAS à cages** possèdent deux avantages essentiels. Aucun contact entre stator et rotor (hormis les roulements) et très faibles coût de conception. Pour une machine à cage, le rotor est mis en Court-circuit et autorise des vitesses de rotation élevées :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- **Rotor**
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

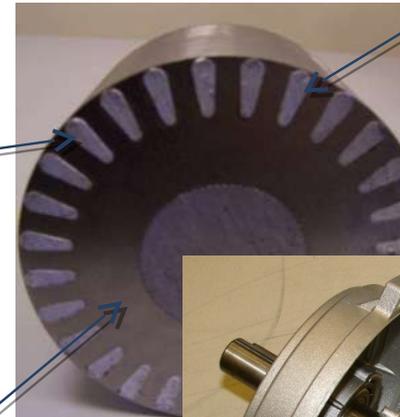
3. Machines synchrones

Barres en alliages d'aluminium en général (poids réduit) :

- bon conducteur électrique

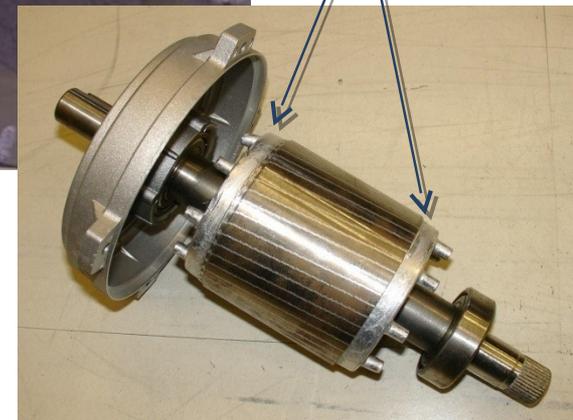
Matériaux ferromagnétiques :

- bon conducteur magnétique
- mauvais conducteur électrique (fesi 3% ...)



Encoches profondes (effet de peau)

Anneaux de court-circuit (soudés ou brasés)



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

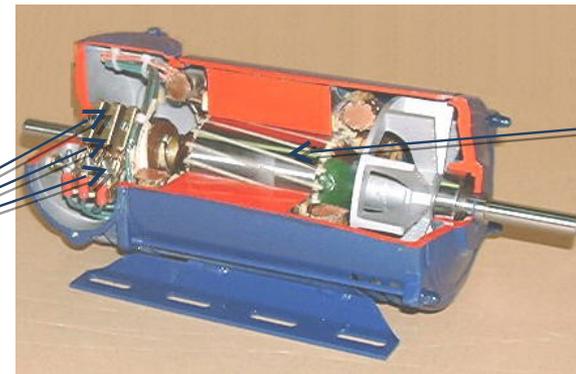
2. Machines asynchrones

- **Rotor**
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Les **MAS à bagues (ou rotor bobiné)** sont plus coûteuses et possèdent à puissance donnée un poids plus important qu'une MAS à cage. Elles autorisent également des vitesses de rotation plus faibles (inertie des enroulements) que les machines à cages et certaines machines synchrones. Il a y également le problème d'usures des contacts entre rotor et stator:

3 bagues pour accéder aux enroulement rotoriques



Conception du rotor très proche de celle du stator



**MAS à bagues parfois utilisées pour la production car l'électronique de puissance est moins coûteuse (dimensionnée pour la puissance transportée au rotor) !**

Découvrons le principe de fonctionnement des machines asynchrones en 4 étapes fondamentales :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

• **Le stator est parcouru par un champ magnétique tournant** de pulsation égale à la pulsation des courants statoriques au nombre de paires de pôle près.

• **Les conducteurs électriques rotoriques** (bobines, barres d'alliages ...) subissent de fem (forces électromotrices) induites par les variations d'induction magnétique.

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Fem induite} \quad \rightarrow \quad e(t) = - \frac{d \cdot \Phi(t)}{dt}$$

Equations de Maxwell,  
forme locale

Par intégration sur un  
contour

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

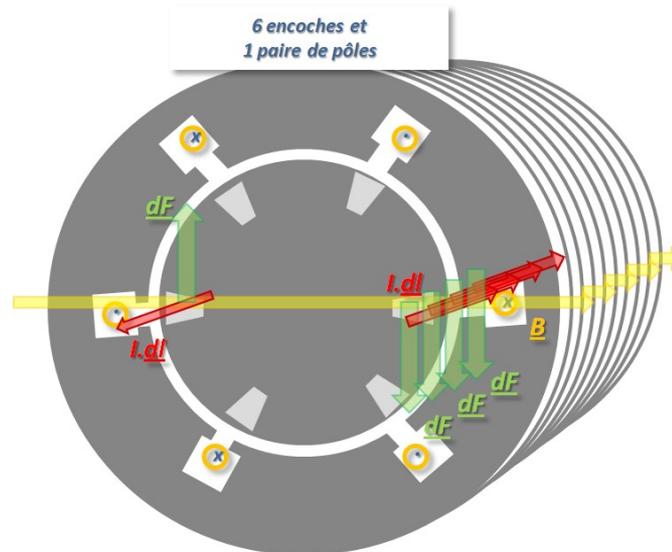
2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

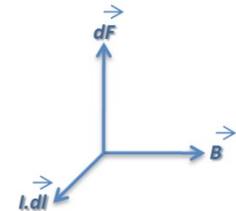
3. Machines synchrones

• Les fem induites au sein des conducteurs rotoriques induisent des **courants**

• Les courants induits dans les conducteurs sont brassés par le champ magnétique tournant et induisent des **forces de Laplace** (résultante macroscopique des forces de Lorentz).



$$\vec{dF} = I \cdot \vec{dl} \wedge \vec{B}$$



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

• Les forces de Laplace mettent en mouvement le rotor qui tourne dans **le même sens que le champ tournant** statorique.

• Cette rotation ne peut perdurer que si des courants sont induits ... donc que si il y a des variations de champ magnétique au rotor ... donc que si la vitesse de rotation du rotor est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. **D'où le nom de ces machines ... Machines Asynchrones**

$$\Omega \leq \Omega_s$$



avec :

$$\Omega_s = w_s/p$$

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Un paramètre essentiel concernant les machines asynchrones est le glissement (variation relative entre  $\Omega$  et  $\Omega_s$ ). En fonctionnement nominal, le glissement est généralement  $< 10\%$  :

$$g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s$$

Prenons quelques valeurs caractéristiques :

- $g < 1$  :  $\Omega > 0$  (fonctionnement moteur)
- $g = 1$  :  $\Omega = 0$  (arrêt et avant démarrage)
- $g = 0$  :  $\Omega = \Omega_s$  (impossible sans une aide mécanique. A vide,  $\Omega \neq \Omega_s$ )
- $g > 1$  :  $\Omega_s < 0$  (freinage magnétique fonctionnement génératrice)
- $g < 0$  :  $\Omega > \Omega_s$  (hypersynchrone - freinage)

Au fonctionnement nominal, les courants rotoriques possèdent une pulsation “ $w_r$ ” faible :

$$w_r/p = \Omega_s - \Omega$$

Les courants rotoriques génèrent également un champ magnétique tournant à la vitesse “ $\Omega_r$ ”, vu du rotor :

$$\Omega_r = w_r/p$$

En résumé (vu du stator), stator et rotor génèrent un champ magnétique tournant à la même vitesse :

$$\Omega_s = w_s/p$$

$$\Omega_s = \Omega_r + \Omega$$

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Partons de l'étude réalisée autour des transformateurs et analysons le fonctionnement d'une MAS :

- Prenons MAS à bagues. 3 enroulements rotoriques bobinés, idem côté stator.
- Bloquons le rotor, injectons un système triphasé de tensions côté stator et récupérons via les bagues les tensions générées au rotor.
- **Nous venons de fabriquer un transformateur ...** certes un peu cher. **Le modèle d'une machine asynchrone sera donc très proche de celui d'un transformateur !**

La modélisation sera faite en régime permanent au 1<sup>er</sup> harmonique. Le modèle étudié est un modèle à inductances couplées. Le rotor étant le plus souvent mis en court-circuit en fonctionnement moteur, voici le schéma équivalent par phase d'une MAS :

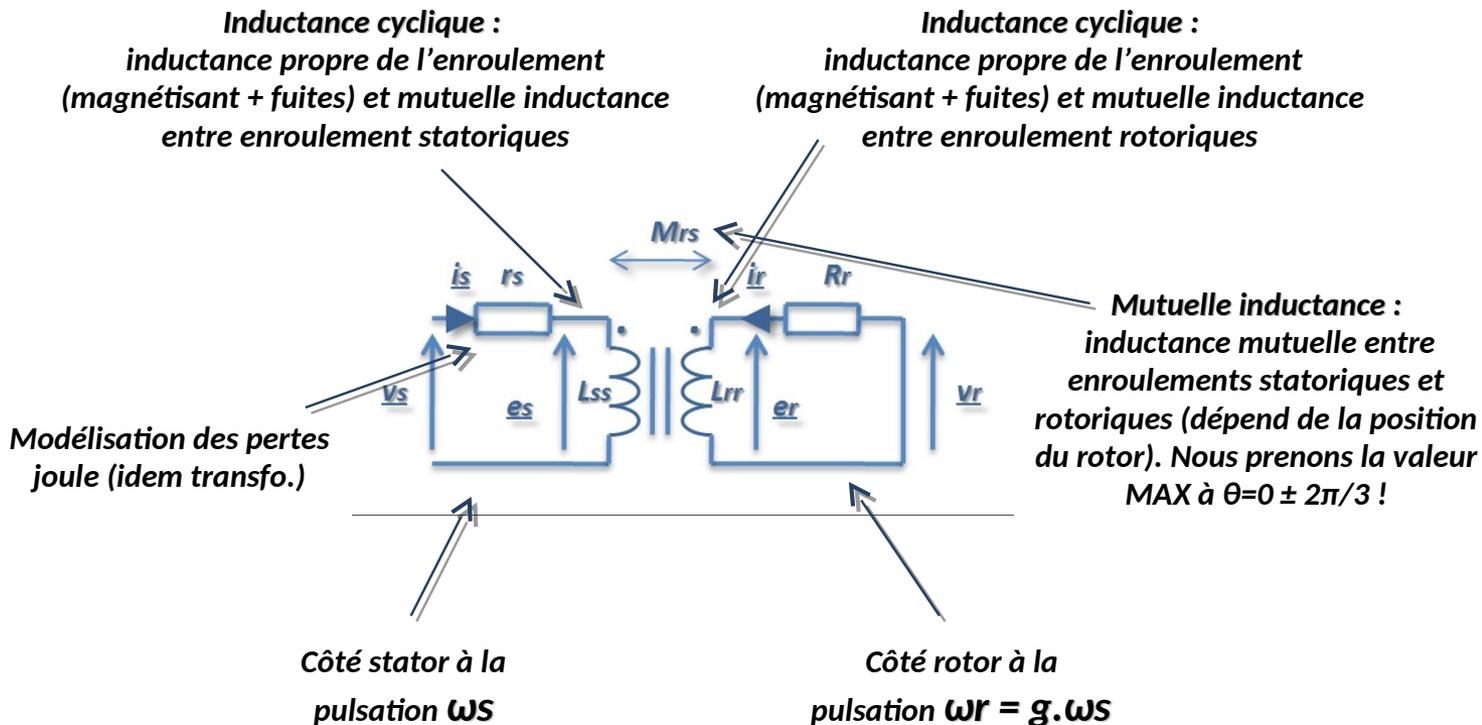
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



... à la découverte des machines électriques

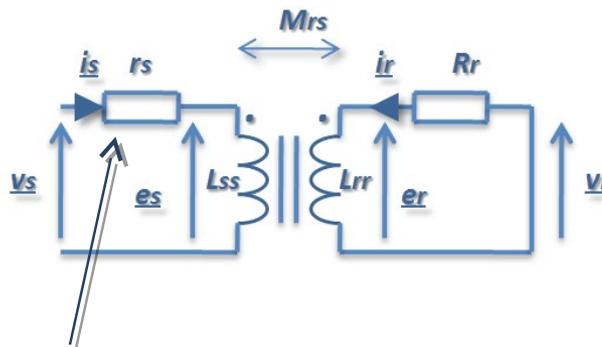
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

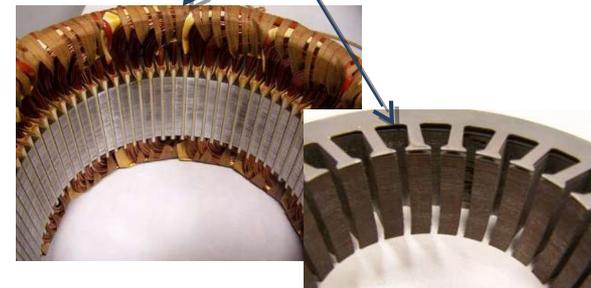
3. Machines synchrones

Une inductance cyclique modélisent l'inductance propre de l'enroulement (magnétisant et fuites) ainsi que les couplages magnétiques (effet de mutuelle) entre enroulements d'un même côté (stator-stator ou rotor-rotor) en donnant l'illusion que le flux propre à cette phase ne dépend que du courant alimentant celle-ci :



Les pertes Joule sont principalement amenées par la résistance propre aux conducteurs. Elles sont faible en forte puissance car les conducteurs possèdent une section relativement grande sous un niveau de tension élevé !

Dans une machine, les fuites magnétiques sont principalement localisées dans les chignons et les encoches. Toutes lignes de champs non canalisées dans le circuit magnétique !



... à la découverte des machines électriques

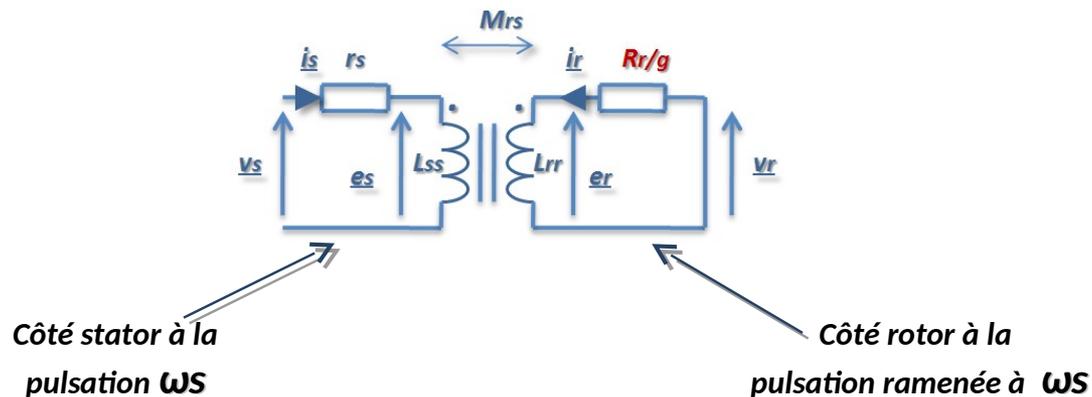
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Avançons dans l'étude du modèle et sa simplification afin d'obtenir un modèle facilement utilisable et identifiable :



$$\underline{V}_s = (r_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{ss}) \cdot \underline{i}_s + j \cdot \omega_s \cdot M_{rs} \cdot \underline{i}_r'' \quad \leftarrow \text{Courant fictif d'amplitude } I_r \text{ et de pulsation } \omega_s$$

$$0 = \left( \frac{r_r}{g} + j \cdot \omega_s \cdot L_{rr} \right) \cdot \underline{i}_r + j \cdot \omega_s \cdot M_{rs} \cdot \underline{i}_s'' \quad \leftarrow \text{Courant fictif d'amplitude } I_s \text{ et de pulsation } \omega_r$$

... à la découverte des machines électriques

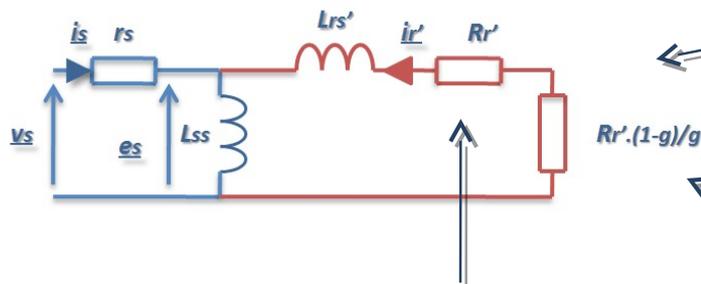
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Afin d'obtenir un modèle facilement identifiable, nous devons ramener toutes les grandeurs au stator. Dans toute l'étude, le circuit magnétique est supposé homogène et non saturé (sans pertes pour le moment) :



Modélise les pertes Joule rotoriques ramenées au stator

Toutes les grandeurs avec un '<'>' sont des grandeurs fictives résultantes de transformations mathématiques et n'ont donc aucun sens physique !

Modélise la puissance électromécanique utile de la machine

$$L'_{rs} = L_{ss} \cdot \left( \frac{L_{ss} \cdot L_{rr}}{M_{rs}^2} - 1 \right)$$

$$R'_r = r_r \cdot \left( \frac{L_{ss}^2}{M_{rs}^2} \right)$$

... à la découverte des machines électriques

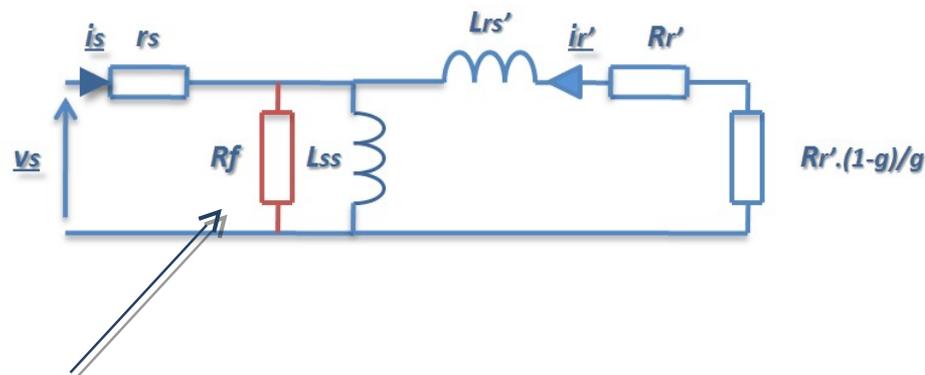
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Il est également possible de tenir compte des pertes fer même si un modèle résistif ne sera plus très rigoureux en vitesse variable. Tous les éléments de ce modèle sont alors identifiables via un essai au synchronisme ( $g \# 1$ ) et un essai à rotor bloqué (vitesse nulle -  $g=0$ ) :



• Pertes par courants de Foucault : stator et rotor feuilletés avec tôles isolés électriquement. Matériaux à très forte résistivité (fesi 3%)

• Pertes par Hystérésis : Forte perméabilité (très bonne conduction magnétique) tout en ayant des propriétés de désaimantation faible (cycle étroit !)

Effectuons un rapide bilan de puissance en fonctionnement moteur :

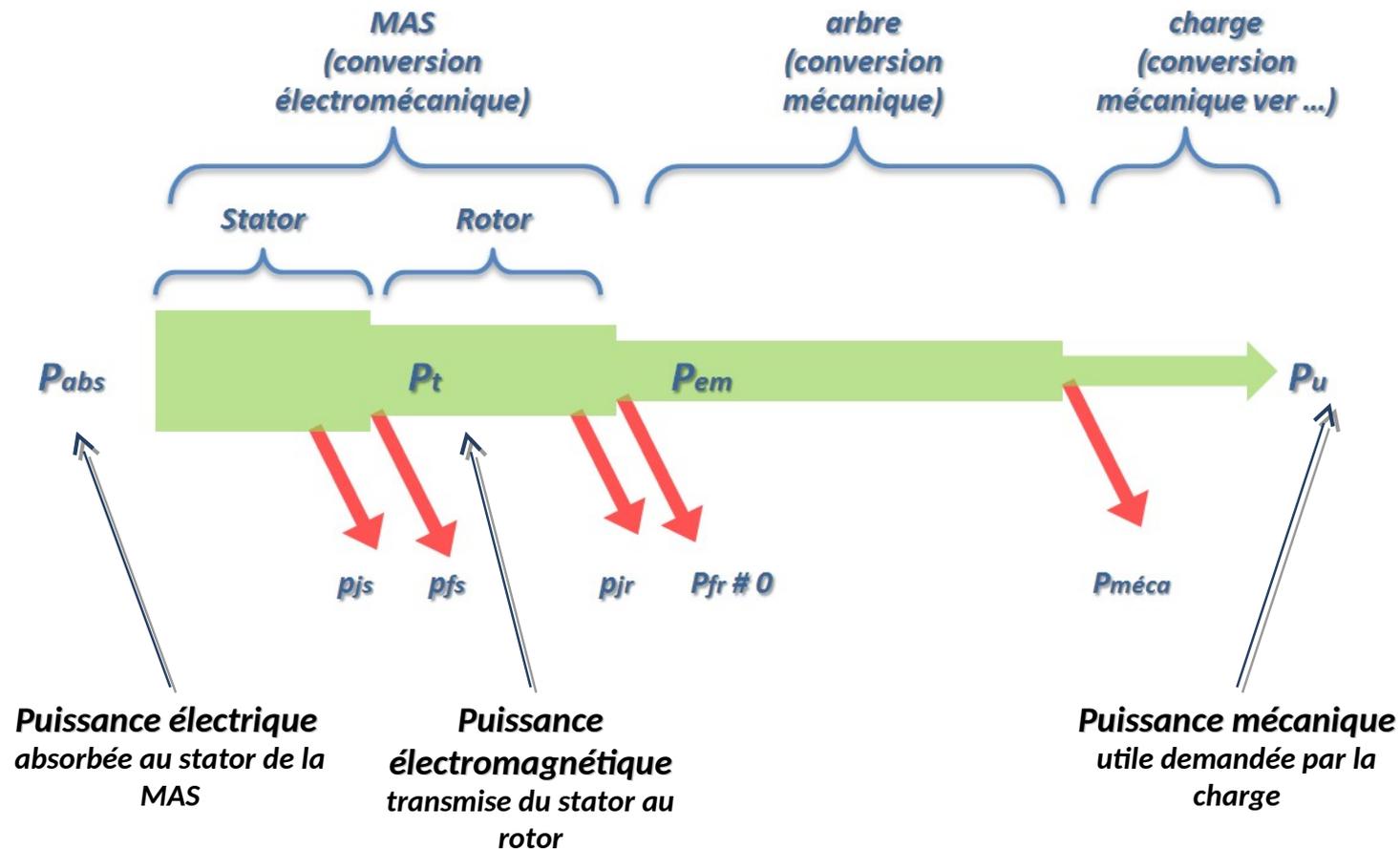
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



... à la découverte des machines électriques

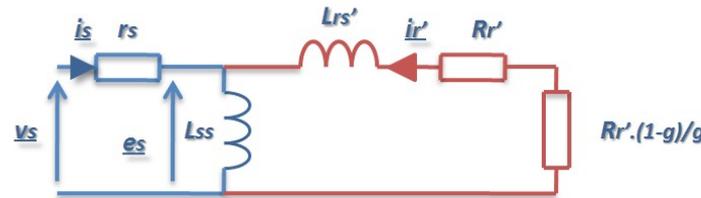
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

En négligeant les pertes Joule statoriques (~2% d'erreur) ainsi que les pertes fer, nous pouvons obtenir l'expression du couple électromécanique (N.m) :



Modélise la puissance électromécanique utile de la machine

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = 3 \cdot R_r' \cdot \frac{1-g}{g} \cdot I_r^2$$

$$I_r^2 = \frac{V_s^2}{(L_{rs}' \cdot \omega_s)^2 + \left(\frac{R_r'}{g}\right)^2}$$

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- **Couples**
- Commandes

3. Machines synchrones

Nous pouvons alors facilement retrouver l'expression du couple électromécanique en fonction du glissement puis en fonction de la vitesse :

$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}$$

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L'_{rs}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \qquad g_{max} = \frac{R_r^2}{L'_{rs} \cdot \omega_s}$$

Nous pouvons exprimer le couple en fonction de la vitesse en nous aidant de cette relation :

$$\Omega = (1 - g) \cdot \frac{\omega_s}{p}$$

Interprétons maintenant l'évolution du couple électromécanique que peut fournir la machine en fonction de la vitesse :

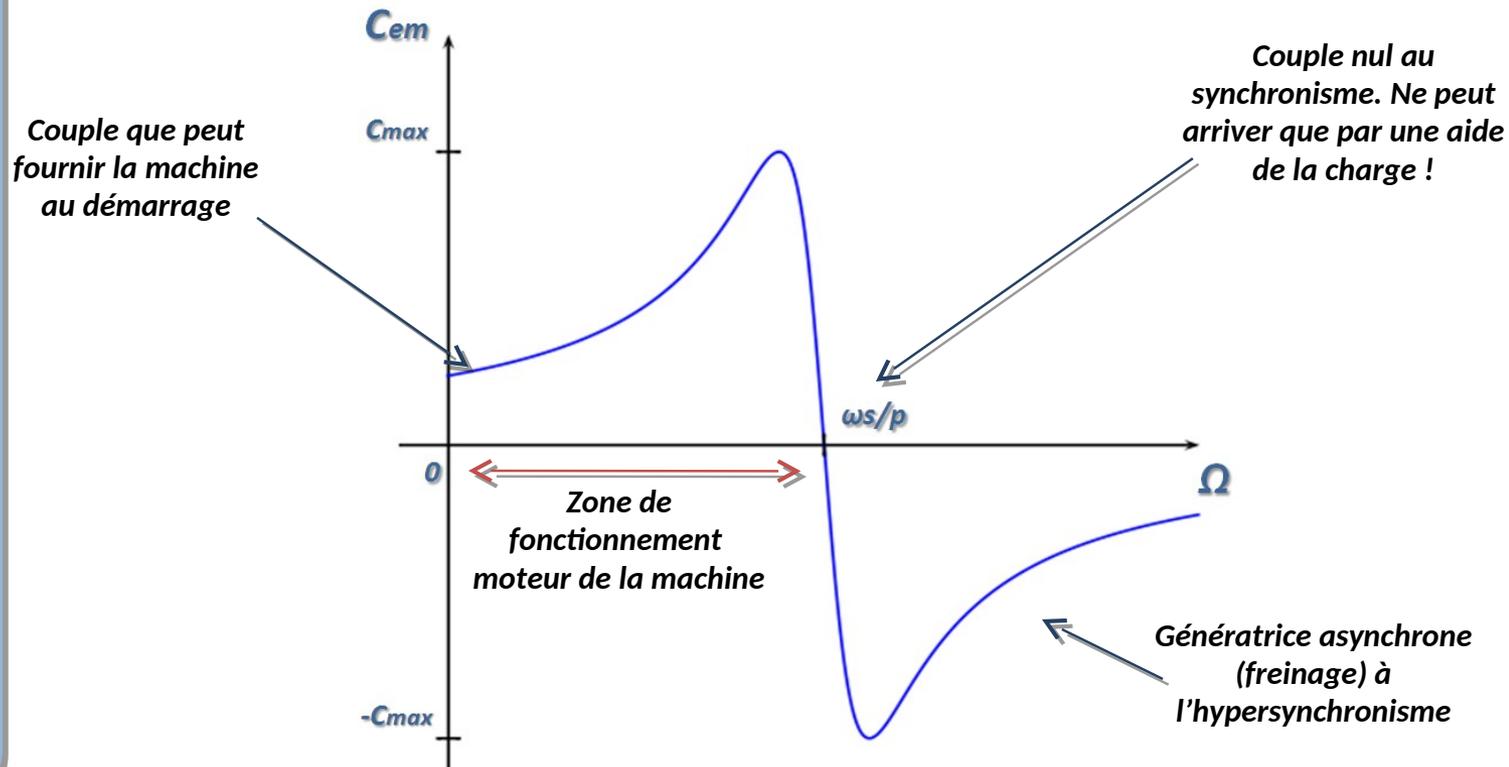
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



Observons maintenant un exemple de couple imposé par une charge :

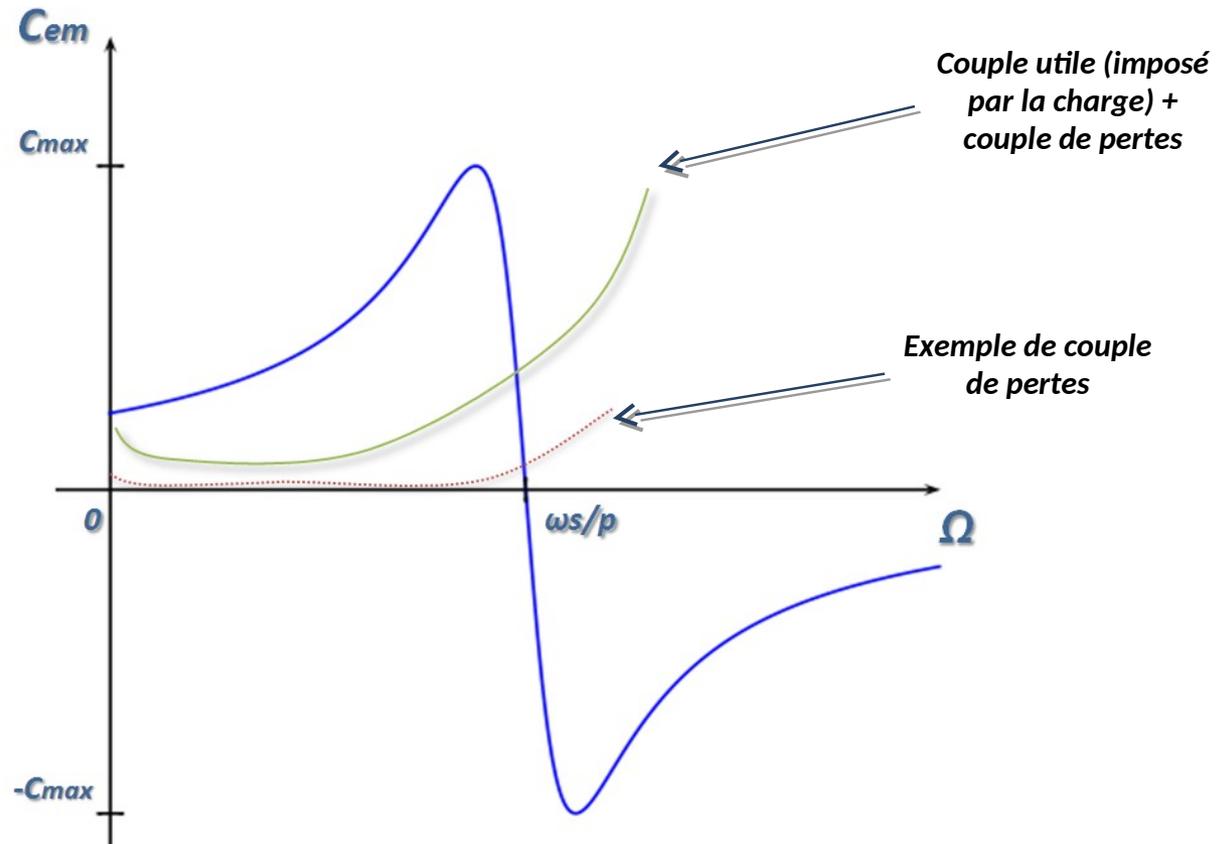
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



A quels phénomènes sont principalement dues les pertes mécaniques dans une conversion électromécanique :

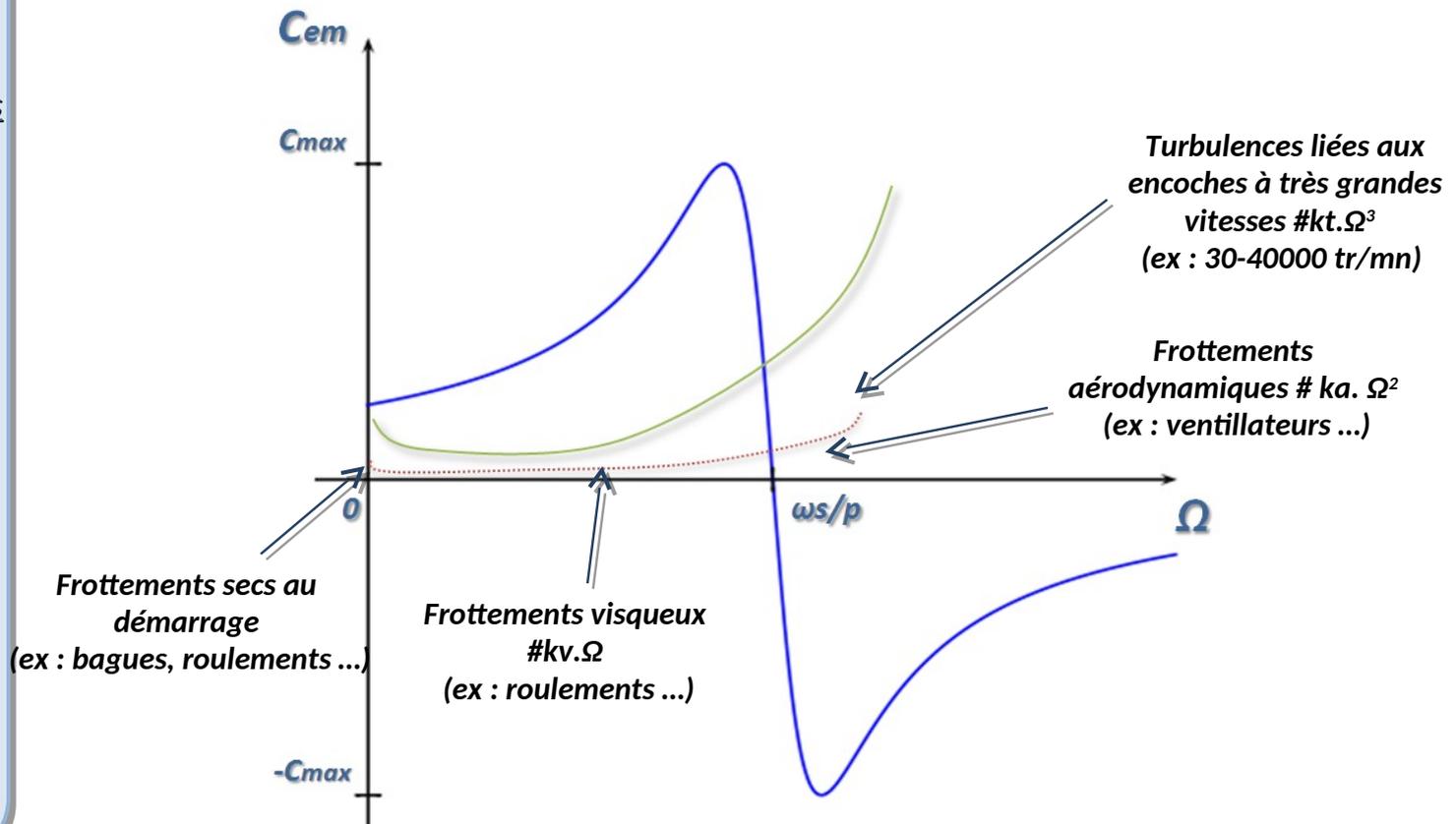
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



Observons maintenant un exemple de couple imposé par une charge :

... à la découverte des machines électriques

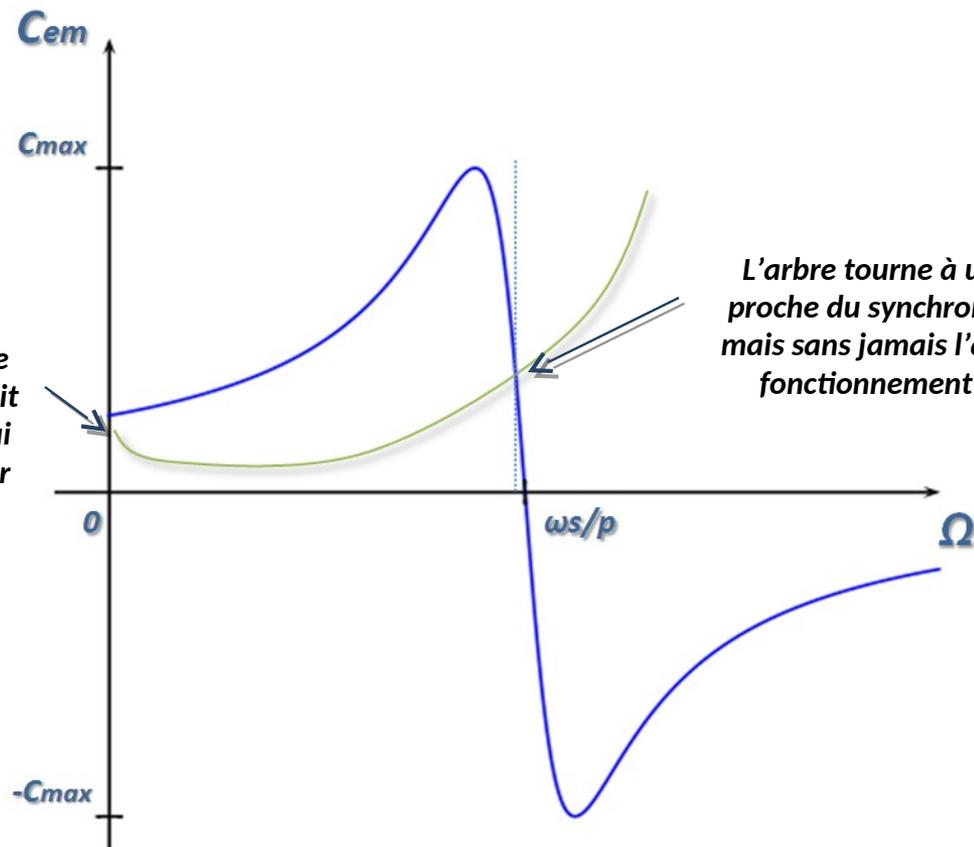
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

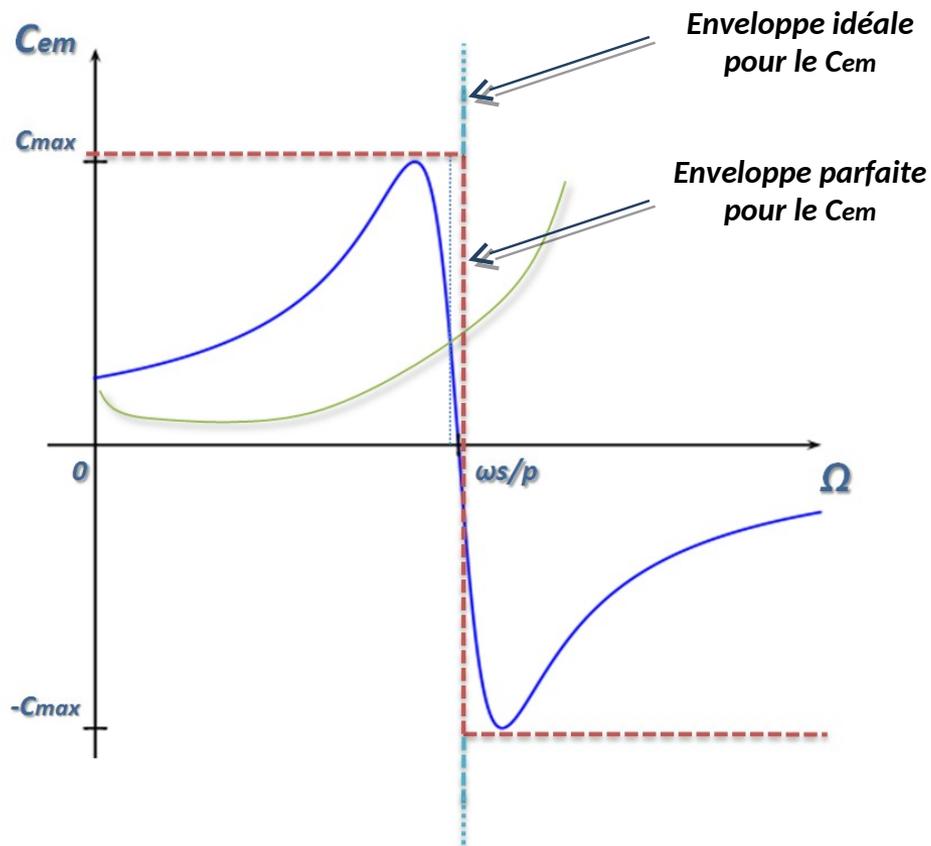
3. Machines synchrones

Le couple au démarrage imposé par la charge doit être plus faible que celui pouvant être délivré par la machine !



L'arbre tourne à une vitesse proche du synchronisme ( $g \neq 0$ ) mais sans jamais l'atteindre en fonctionnement moteur !

Si nous souhaitions travailler à vitesse constante, il nous faudrait idéalement un couple électromécanique tel que celui-ci :



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Il existe deux grands modes de fonctionnement et d'utilisation des machines :

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**  
démarrage direct, démarrage étoile/triangle ou démarrage via démarreur progressif électronique (compresseurs, pompes, broyeurs ...).

- **Fonctionnement à vitesse variable :**  
Commandes scalaires et vectorielles via un variateur de vitesse (ferroviaire, machines outils, propulsion ...).

Altistar 48 - démarrage/arrêt (telemecanique)



Altisvar 71 - variateur vectoriel (telemecanique)



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

En 2010, la société **Schneider Electric** est leader mondiale dans les domaines de la variation de vitesse (variateurs-altivar, démarreurs-altistar ...). La filiale du groupe s'occupant de cette branche de la mécatronique se nomme **Telemecanique** :

**Schneider**  
 **Electric**

 **Telemecanique**

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Concernant les commandes scalaires (action sur l'amplitude des grandeurs et la fréquence), observons les paramètres sur lesquels nous pouvons agir pour effectuer une variation de vitesse :

$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}$$

$$R'_r = r_r \cdot \left(\frac{L_{ss}^2}{M_{rs}^2}\right)$$

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L'_{rs}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad g_{max} = \frac{R_r^2}{L'_{rs} \cdot \omega_s}$$

$$L'_{rs} = L_{ss} \cdot \left(\frac{L_{ss} \cdot L_{rr}}{M_{rs}^2} - 1\right)$$

Nous pouvons agir sur :

$V_s$

$\omega_s$

$r_r$

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Il existe des solutions théoriques non implémentées en pratique agissant uniquement sur  $r_r$  ou encore  $V_s$ . La commande scalaire la plus répandue est la **commande scalaire en flux dîtes en U/f constant**. Le ratio U/f est homogène à un flux (1 WB = 1 V.s) :

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L'_{rs}} \cdot \left( \frac{V_s}{\omega_s} \right)^2$$



**Cette solution permet de travailler à couple MAX constant dans les limites de la plage de fonctionnement de l'électronique de puissance.**

Observons un exemple d'évolution du couple électromécanique en fonction de la vitesse :

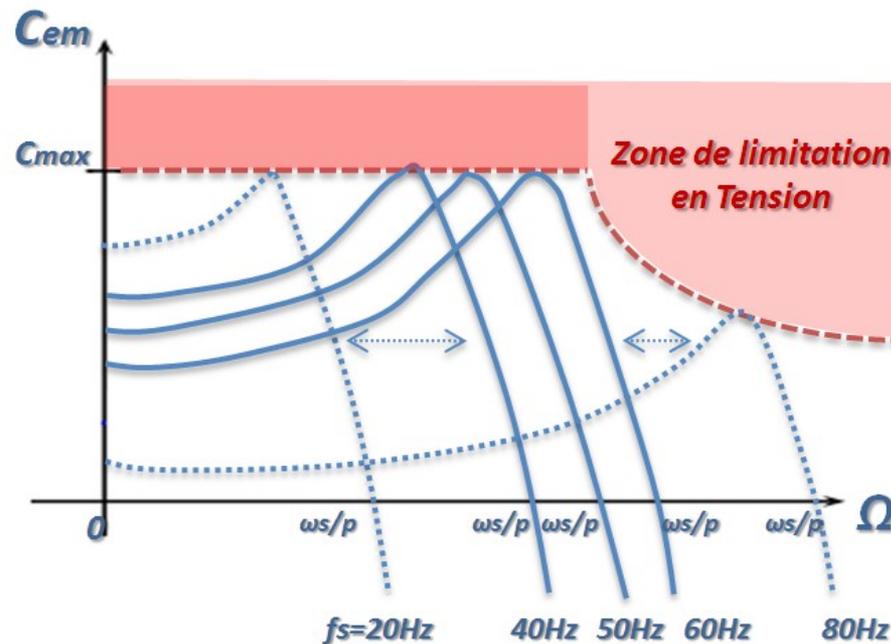
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



... à la découverte des machines électriques

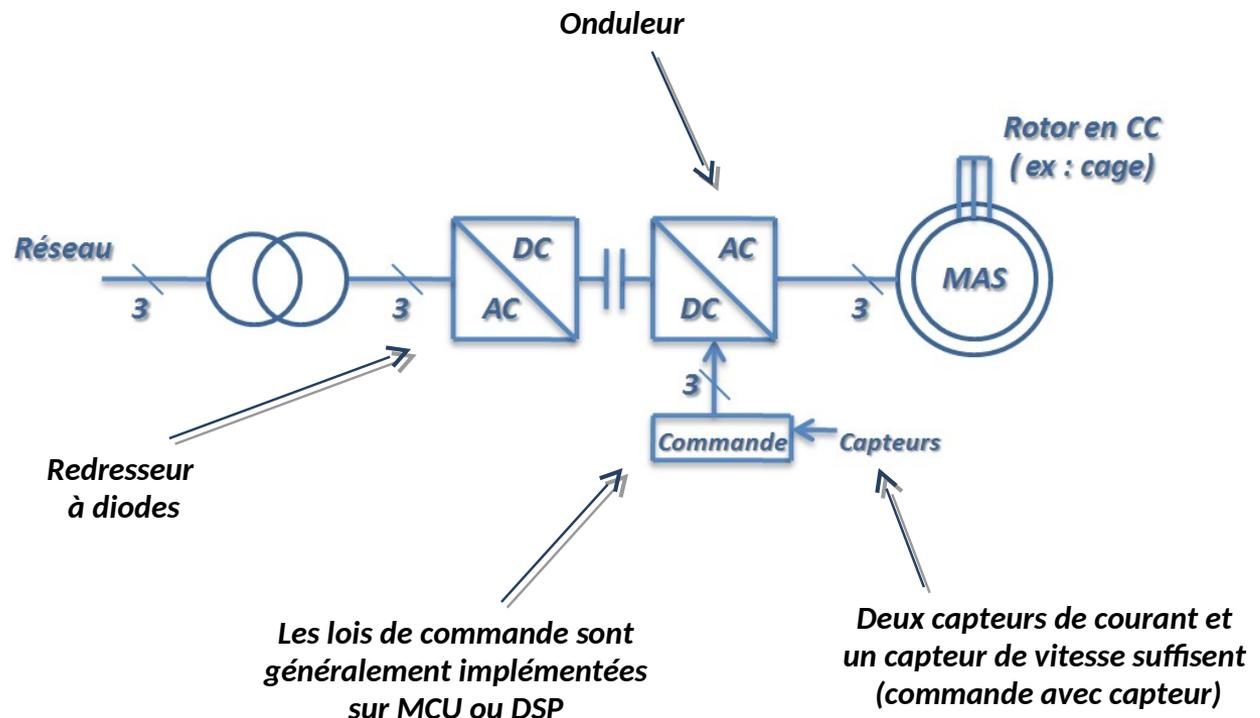
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Observons le schéma représentant l'implémentation en pratique d'une commande en fonctionnement moteur (réversibilité de l'électronique de puissance) :



Que trouve-t-on dans un variateur de vitesse :

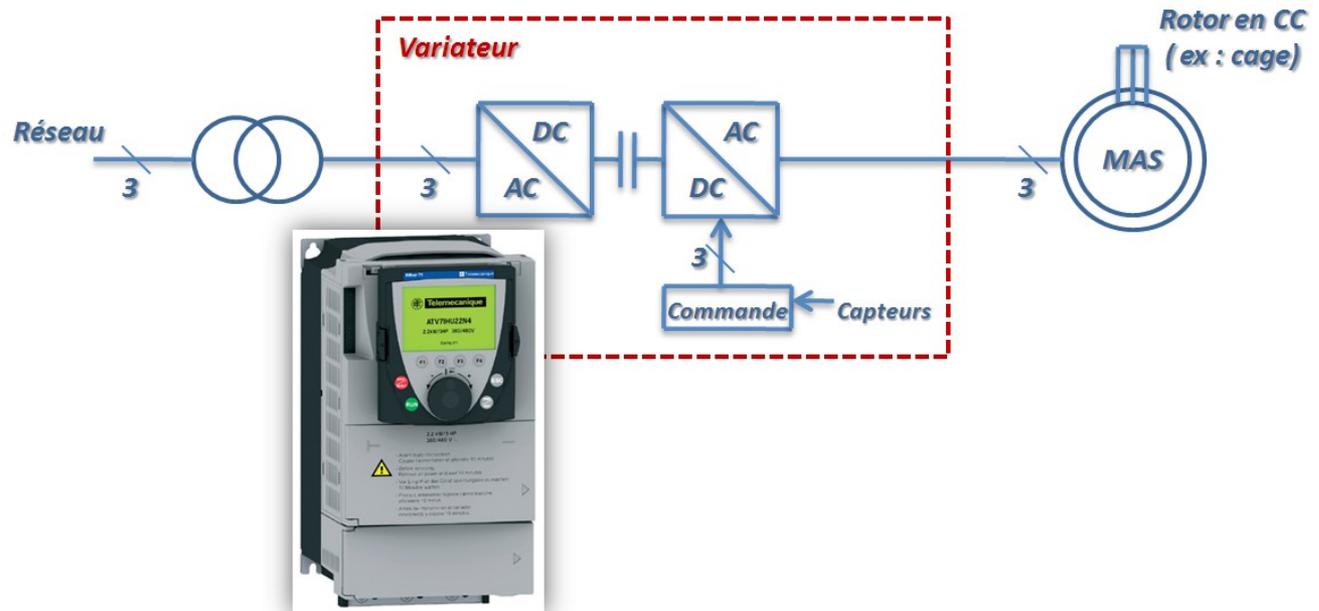
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones



... à la découverte des machines électriques

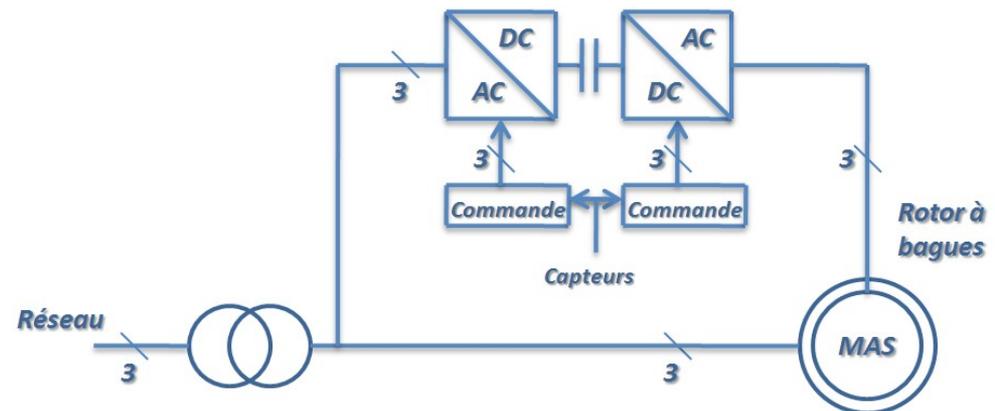
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

En fonctionnement génératrice, la principale utilisation de la MAS est la **MADA** (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Nous retrouvons les MADA dans les éoliennes en forte puissance. Le principal avantage de cette technique de commande est que l'électronique de puissance est moins coûteuse et encombrante. Elle est en effet dimensionnée pour la puissance transportée au rotor (~25% de celle transitée au stator) :





The background features several thick, translucent blue ribbons that flow and curve across the frame, creating a sense of motion and depth. The ribbons are set against a solid, deep blue background. The lighting highlights the edges and curves of the ribbons, giving them a three-dimensional appearance.

# *3. Machines Synchrone*

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

## Machine Synchrone



<https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZIhs>

## 2. Machines Synchrones

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Les machines synchrones sont très répandues dans les domaines de la **production** (centrales électriques, aéronautique, marine ...) ainsi que dans les grands domaines d'applications exigeant un **encombrement et un poids réduit** (aéronautique, automobile ...). Les gros alternateurs possèdent de plus un excellent rendement (~99% pour une MS de 1GW). Prenons quelques exemples d'applications :

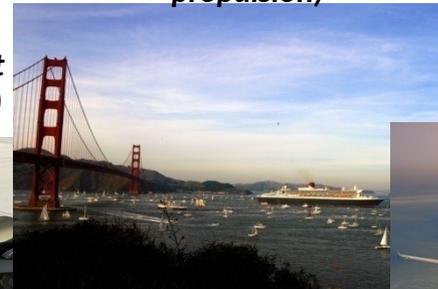
AGV de Alstom  
(MS à aimants)



EX1 de Peugeot  
(MS à aimants)



Queen Mary 2  
(MS à rotors bobinés -  
propulsion)



A380 de chez Airbus  
(MS - générateurs à  
fréquences variables VFG)



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Il existe deux grandes familles de rotors (ou roue polaire) chez les machines synchrones:

- **Rotor à électroaimants** (rotor bobiné).

Machines coûteuses très rencontrées dans les applications exigeant un fort couple et donc une très forte excitation (marine, production, soufflerie ...).

- **Rotor à aimants.** Machines restant encore coûteuses (vs MAS à cages), ceci étant principalement du au coût des aimants mais offrant néanmoins le rapport poids-encombrement-puissance le plus intéressant de toutes les machines tournantes en forte puissance.

... à la découverte des machines électriques

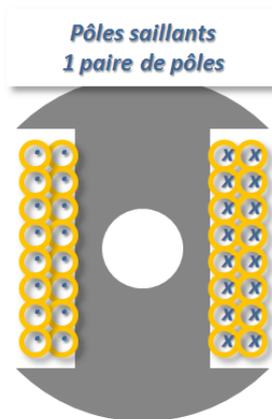
1. Introduction

2. Machines asynchrones

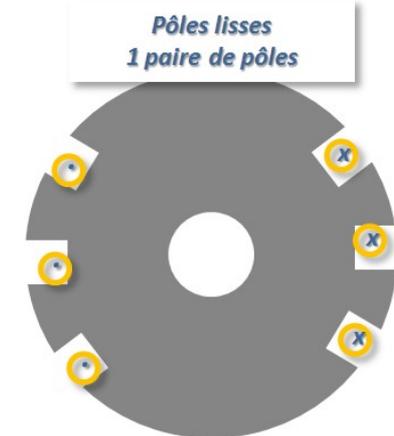
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Découvrons les MS à rotors bobinés à pôles lisses et pôles saillants. Comme pour les MAS à bagues ces machines sont relativement coûteuses et possèdent deux bagues assurant l'alimentation de l'inducteur (usure). Elles offrent néanmoins la possibilité de générer une très forte induction dans la machine :



machine multipolaire. Induction constante au rotor donc pas de pertes par courants de Foucault. Les rotors peuvent être massifs !



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

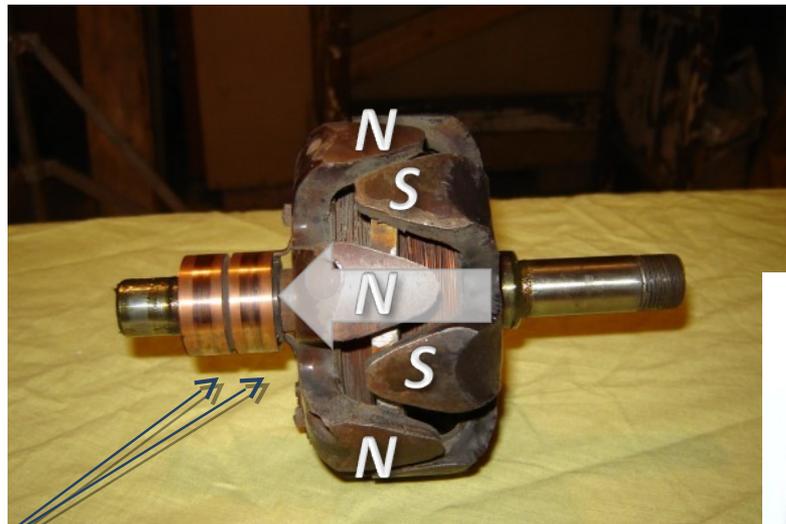
2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

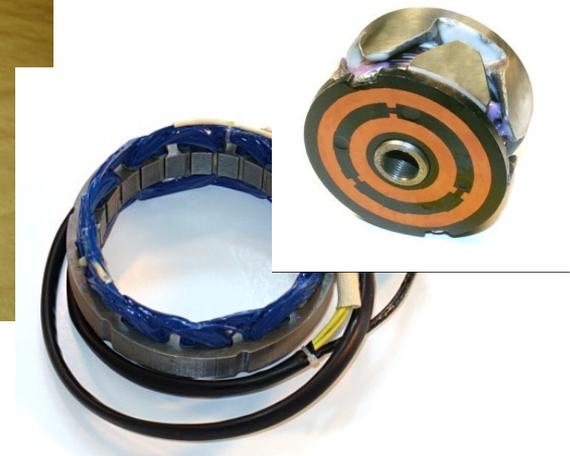
Une machine synchrone connue, que tout le monde utilise au quotidien, est l'alternateur de voiture. Observons le rotor à griffes (bobiné) et la technique utilisée pour générer un grand nombre de paires de pôles :

Alternateur (rotor) de voiture



Bagues  
(alimentation  
de l'inducteur)

Alternateur  
(rotor et stator)  
Honda 900 Hornet



... à la découverte des machines électriques

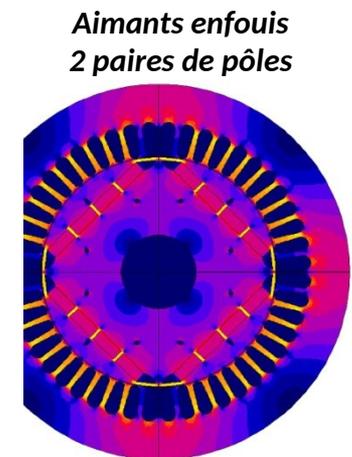
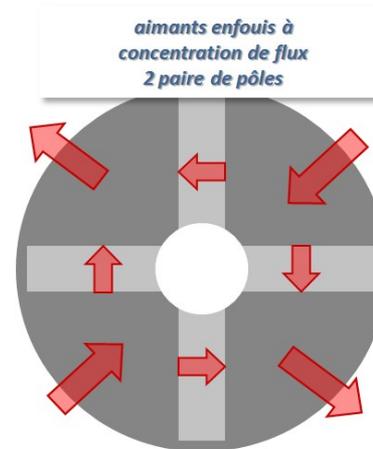
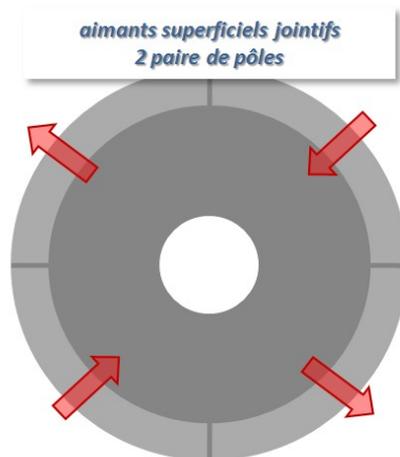
1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Découvrons les **MS à aimants permanents (MSAP)**. Leurs rotors offrent plusieurs avantages, notamment le fait d'offrir un très bon ratio poids-encombrement-puissance et aucunes pertes Joule côté rotor. Selon la technologie de conception (aimants enfouis, superficiels ...), ces machines peuvent tenir de très grandes vitesses de rotation. Prenons quelques exemples :



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Voici les principales familles de matériaux utilisés pour la réalisation d'aimants :

- Ferrites (~0,4 T) : solution économique
- Sm Co (Samarium Cobalt - ~0,5 T) : prix élevé du au Cobalt
- Nd Fe B (Néodyme Fer Bore - ~1,3 T) : prix élevé mais néanmoins en baisse (brevet). Sujet à l'oxydation
- Al ni co (~1,2 T) : se désaimante facilement mais est peu sensible à la température

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

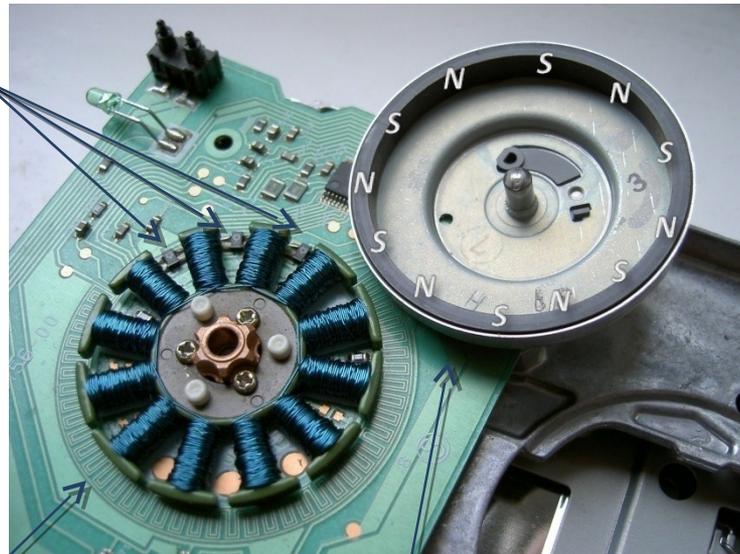
Des célèbres machines synchrones à aimants à pôles lisses avec aimants superficiels jointifs, sont les "petites" machines tournantes utilisées dans les ventilateurs de PC, lecteurs CD ... (brushless DC motor) :

Lecteur de Disquette  
(alimentation en créneaux)

Capteurs  
de position

Stator

Rotor



Ventilateur de PC  
(alimentation en créneaux)



... à la découverte des machines électriques

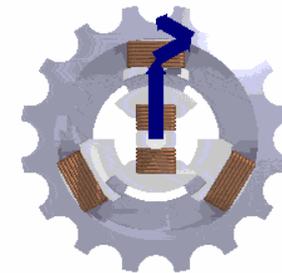
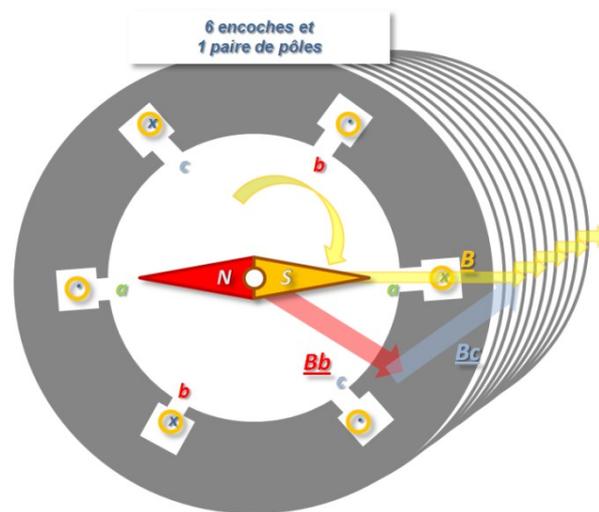
1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Le principe de fonctionnement d'une machine synchrone est proche de celui d'une boussole baignant dans un champ magnétique tournant :



**En fonctionnement normal (sans décrochage ...), une machine synchrone travaillera toujours au synchronisme (vitesse du champ tournant = vitesse du rotor) !**

De quoi dépend le couple électromécanique pouvant être délivré par la machine :

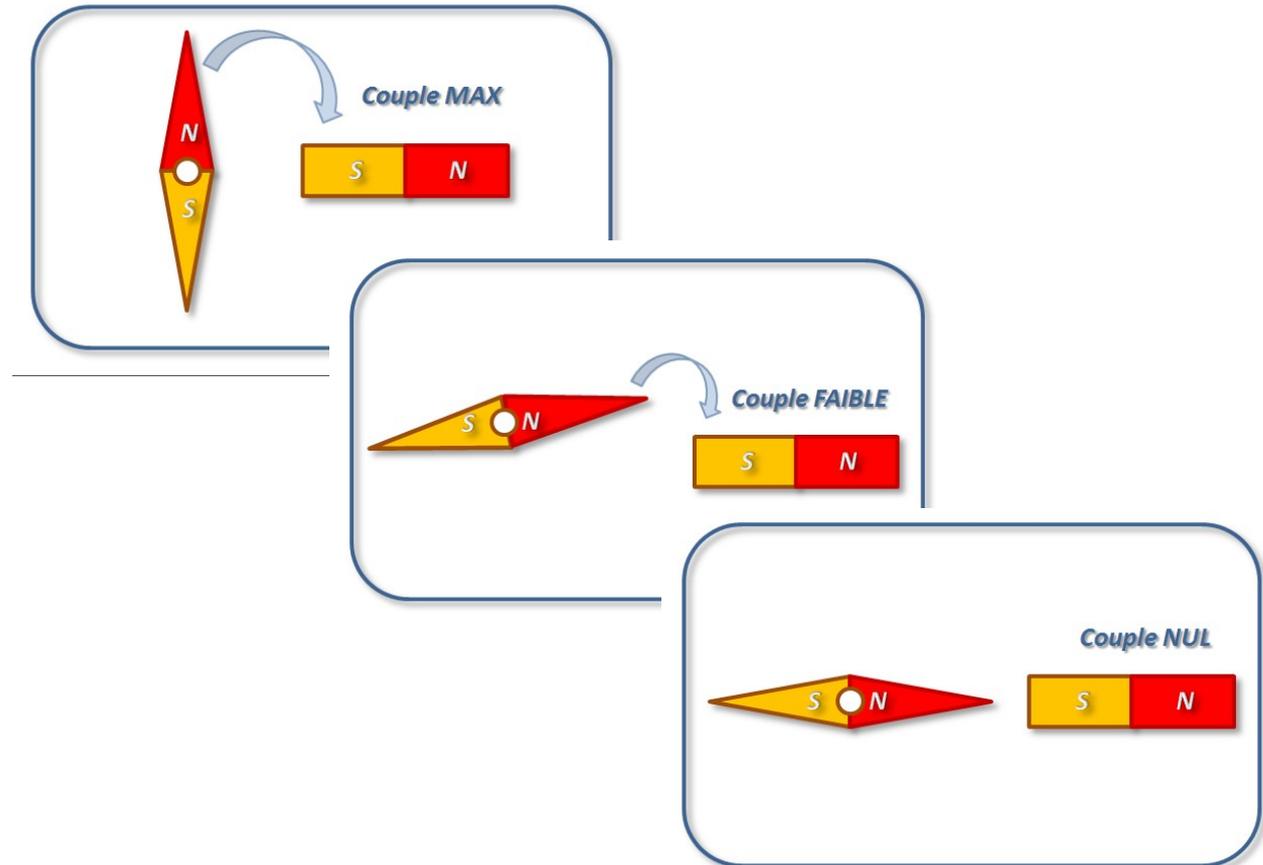
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

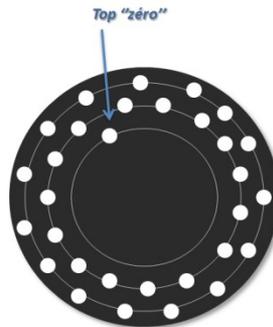
2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Le couple d'une MS est commandé en pilotant l'angle entre les champs statorique et rotorique. L'angle utilisé par la commande se nomme **angle d'autopilotage**. Le principe même de fonctionnement d'une MS impose donc des contraintes :

- Nous devons connaître la position exacte du rotor durant une commande (codeur incrémental avec top zéro ...). **Impossible de travailler avec un capteur de vitesse.**



Codeur incrémental IMV58

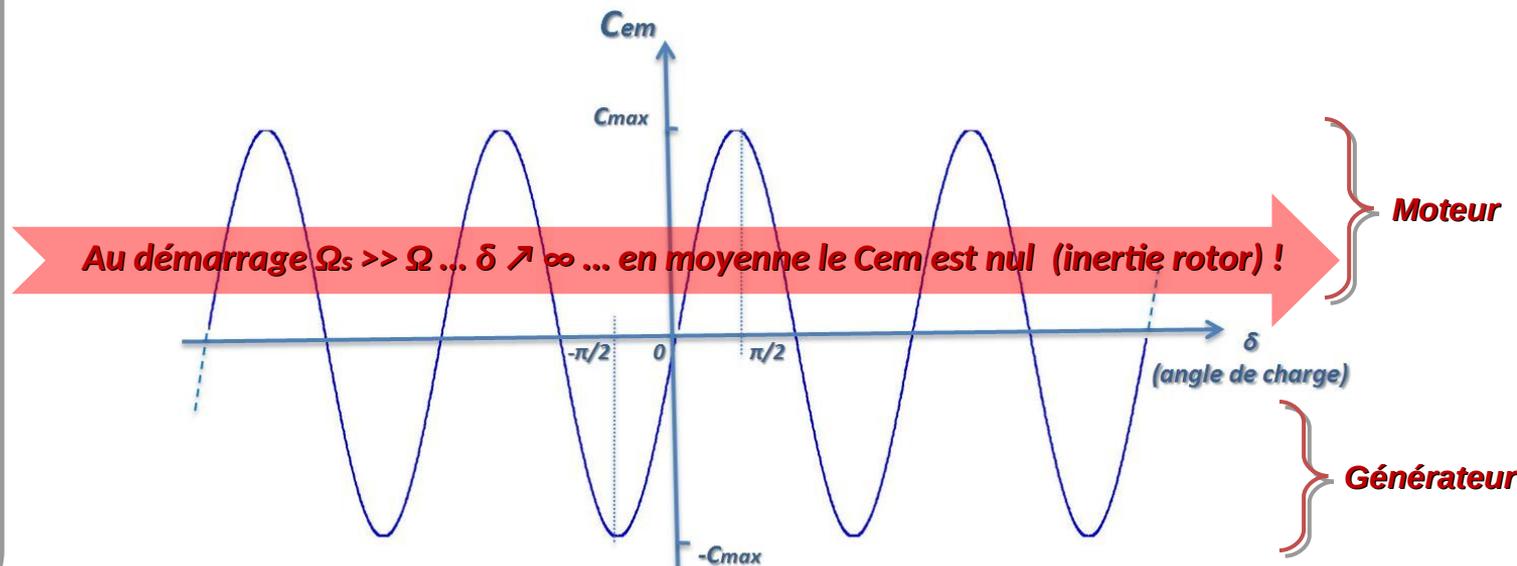


... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

• Contrairement aux MAS, une MS ne peut pas démarrer par un couplage direct au réseau. **Il y a donc obligation de démarrer puis piloter une MS via une électronique de puissance (variateur...).** En convention moteur, observons l'évolution du couple :



... à la découverte des machines électriques

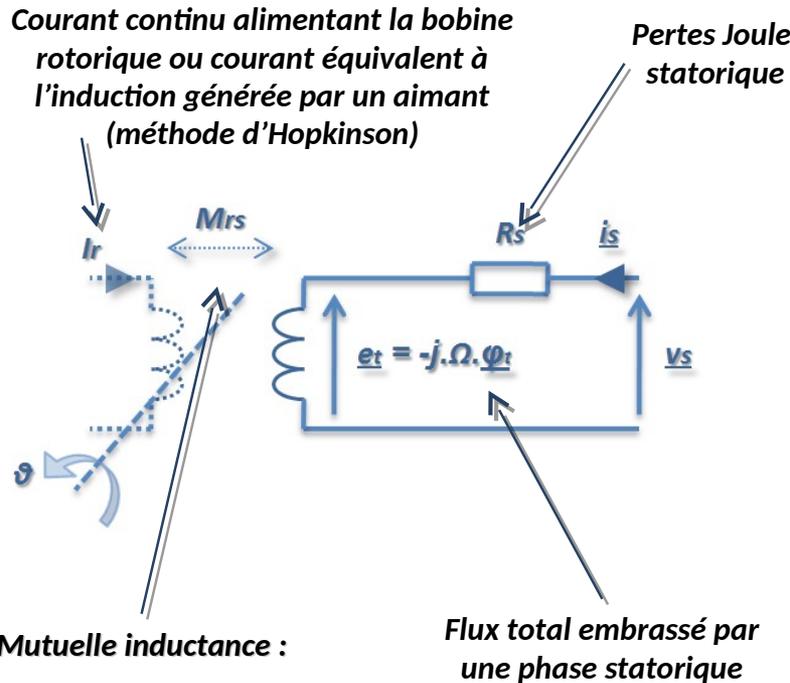
1. Introduction

2. Machines asynchrones

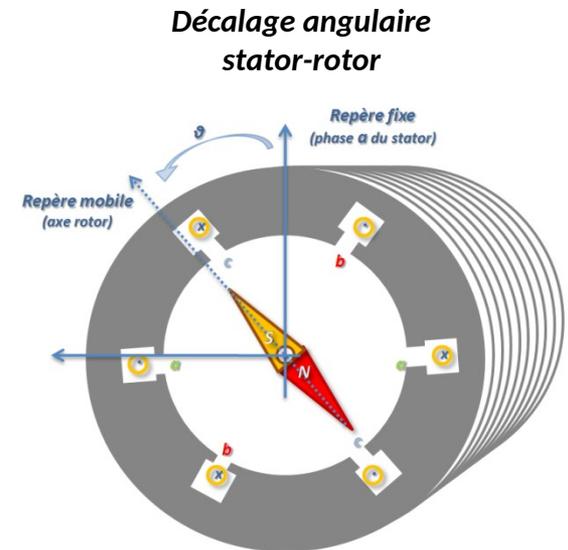
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Découvrons le modèle par phase d'une machine synchrone à pôles lisses en convention moteur (en régime permanent au 1<sup>er</sup> harmonique et en régime non saturé) :



Valeur MAX de l'inductance mutuelle entre enroulements statoriques et roue polaire.



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

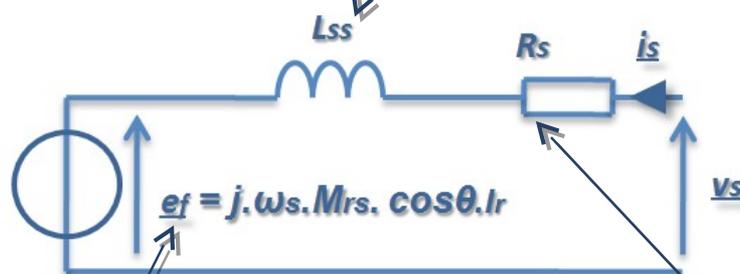
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Il existe plusieurs modèles de la MS en fonction des paramètres que nous souhaitons privilégier. L'un des plus répandu et identifiable est celui donné ci-dessous dit de **Behn-Eschenburg** :

Inductance cyclique (idem MAS) :

inductance propre de l'enroulement (magnétisant + fuites) et mutuelle inductance entre enroulements statoriques. Induite par la circulation d'un système triphasé de courants au stator (nulle à vide !).



$e_f$  induite au stator par rotation de l'inducteur (nulle à rotor bloqué !)

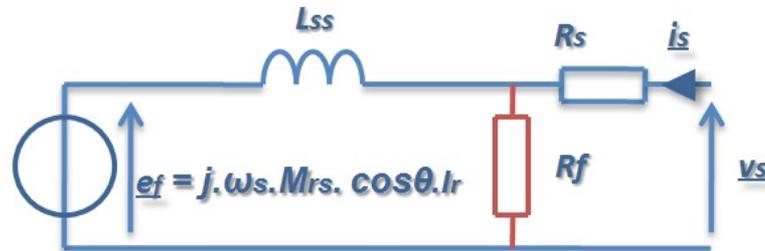
Pour les gros alternateurs,  $R_s \ll L_{ss} \cdot \omega_s$  (réactance synchrone =  $L_{ss} \cdot \omega_s = X_s$ ) !

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Il est si nécessaire possible de tenir compte des **pertes fer**. Remarquons que les pertes par courants de Foucault sont souvent négligées au rotor (pas de variations d'induction). En fréquence variable, Les pertes fer modélisent quasiment uniquement les pertes par courants de Foucault :



... à la découverte des machines électriques

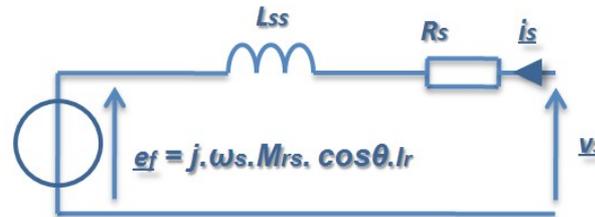
1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Observons l'expression du couple électromécanique (pertes fer négligées). Cette représentation fait apparaître l'angle d'autopilotage  $\Psi$  représentant le déphasage entre  $\underline{ef}$  et  $\underline{is}$  :



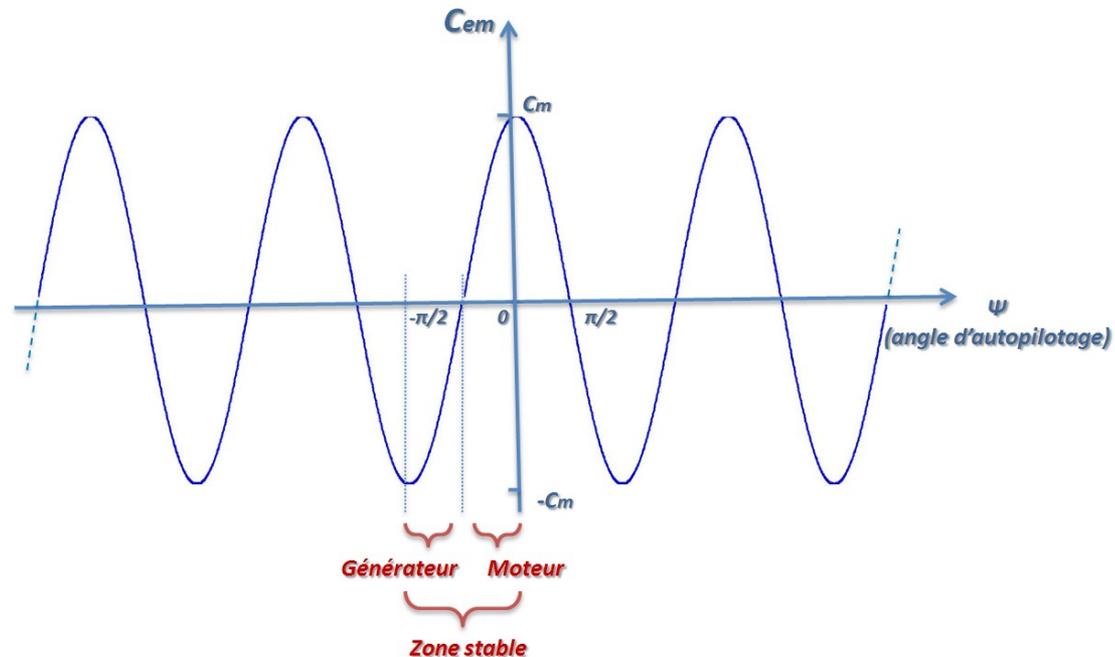
Angle d'autopilotage. Proportionnel à  $\pi/2$  près à l'angle entre les deux champs statorique et rotorique

$$P_{em} = 3 \cdot \langle \underline{ef} \cdot \underline{is} \rangle$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega / p} = \frac{3 \cdot p \cdot E_f \cdot I_s}{\Omega} \cdot \cos \Psi = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s \cdot \cos \Psi$$

Observons l'évolution du couple en fonction de l'angle d'autopilotage  $\psi$  ( $\psi_f$  et  $I_s$  fixés) :

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s \cdot \cos \Psi = C_m \cdot \cos \Psi$$



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

... à la découverte des machines électriques

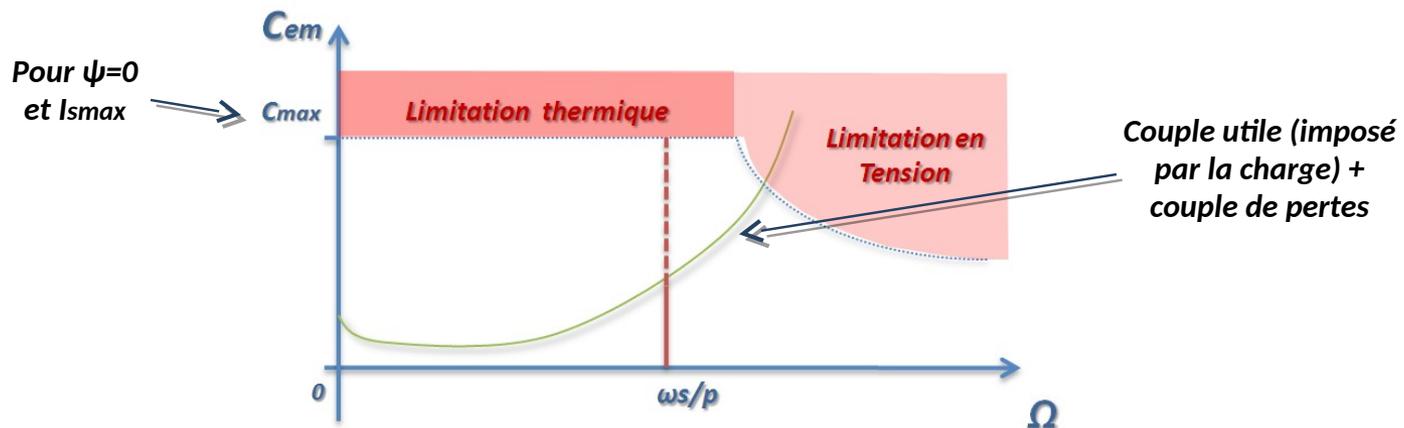
1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Observons l'évolution du couple en fonction de la vitesse. Remarquons que ces deux grandeurs sont indépendantes. En effet, en travaillant avec une électronique de commande (variateur de vitesse) nous pouvons travailler jusqu'au couple MAX quelque soit la vitesse de travail (toujours au synchronisme) :



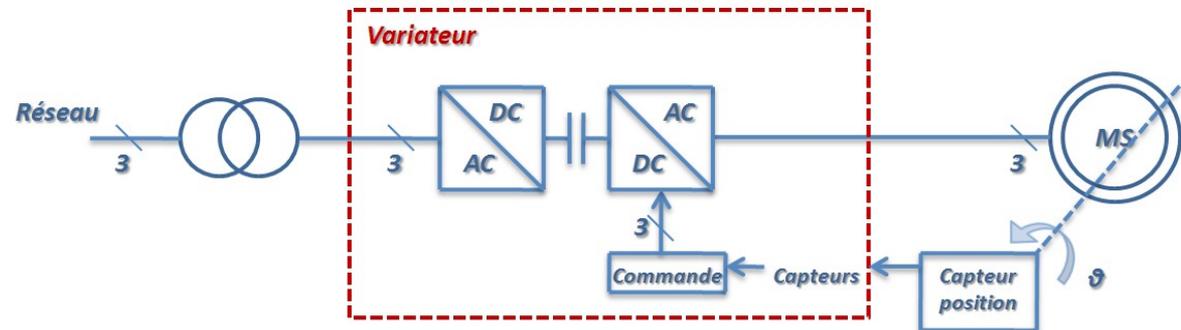
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Prenons un exemple de stratégie de commande. Une loi très répandue impose un **angle d'autopilotage**  $\psi = 0$  (champs statorique et rotorique toujours en quadrature). En fonctionnement moteur, le couple électromécanique pouvant être fourni par la machine sera donc directement proportionnel à l'amplitude des courants absorbés :

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s \cdot \cos \Psi = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s$$



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

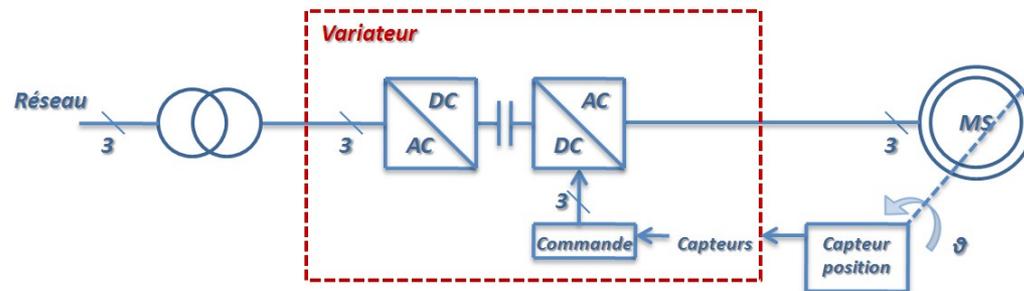
2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

L'électronique de puissance d'un variateur de vitesse pour une MS est la même que pour une MAS. **Seules les lois de commande diffèrent.** De plus une MS est forcément pilotée en utilisant un capteur de position :

Altivar 71plus de Telemecanique (90-2000kW)



Gamme Lexium de Telemecanique. Commande de machines sans balais "Brushless"



***Merci de  
votre attention !***