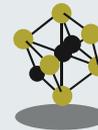
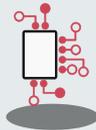


Chapitre 5
Machines
électriques



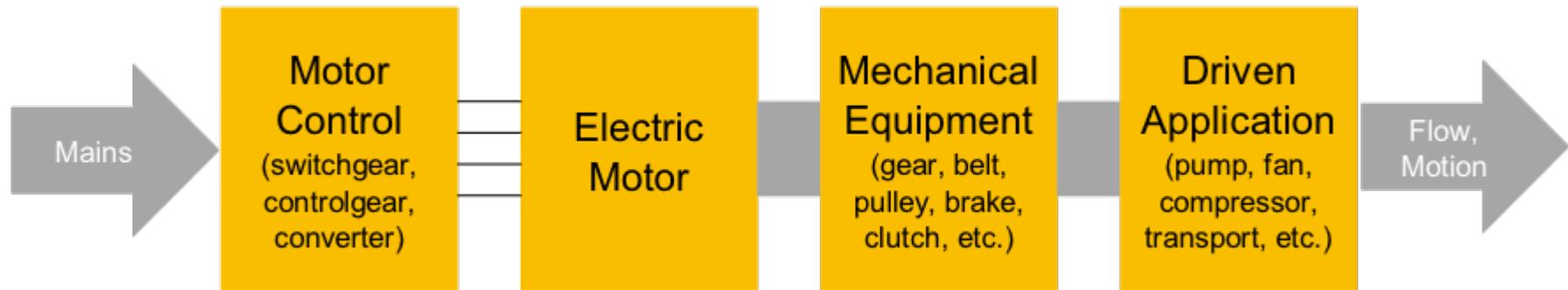
Les **machines électriques** ont pour rôle d'effectuer une conversion d'énergie mécanique vers une énergie électrique, ou l'inverse. Il y a donc deux modes de fonctionnement possibles :

- **Moteur** : machine électrique réalisant une conversion électrique → mécanique.
- **Alternateur** ou **générateur** : conversion mécanique → électrique.

Même si les machines électriques sont réversibles (elles peuvent basculer entre ces deux modes de fonctionnement), ce n'est pas forcément le cas pour l'électronique autour de la machine!

Il faut considérer l'ensemble {convertisseur + machine} dans son intégralité.

Selon l'IEA (*International Energy Agency*), les entraînements électriques représentent 53 % de la consommation électrique mondiale en 2016 [1].



Le site de l'IEC (*International Electrotechnical Commission*) montre l'ensemble des normes ayant été adoptées par les pays pour améliorer l'efficacité énergétique du parc de machines électriques [2]. Par ex : un machine 100 kW à 2 pôles doit avoir $\eta > 96.0\%$ [3].

[1] <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2016>

[2] <https://iec.ch/government-regulators/electric-motors>

[3] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1781&from=DE>



Rame 4402 du TGV POS
(record du monde 574.8 km/h)
→ MS à aimants permanents

RMS Queen Mary 2 → MS à rotor bobiné



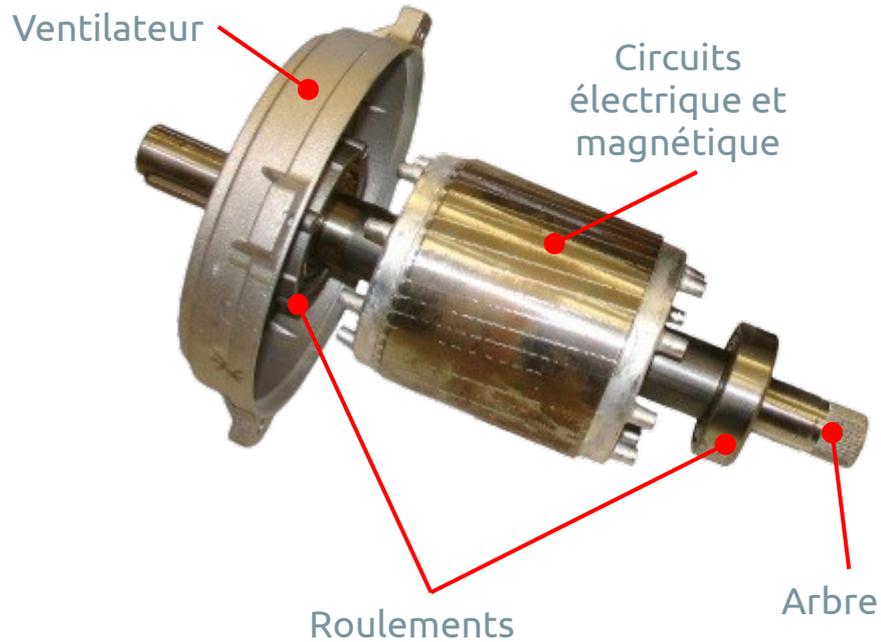
Compresseur Dixair
→ MAS à cage



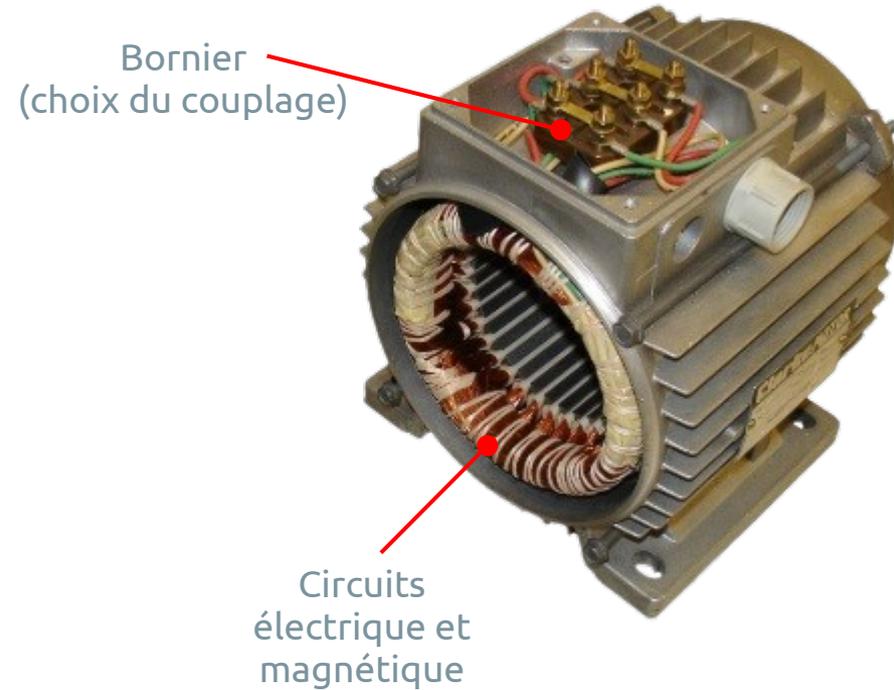
RePower → MAS à rotor bobiné, MADA



Rotor (partie en rotation)



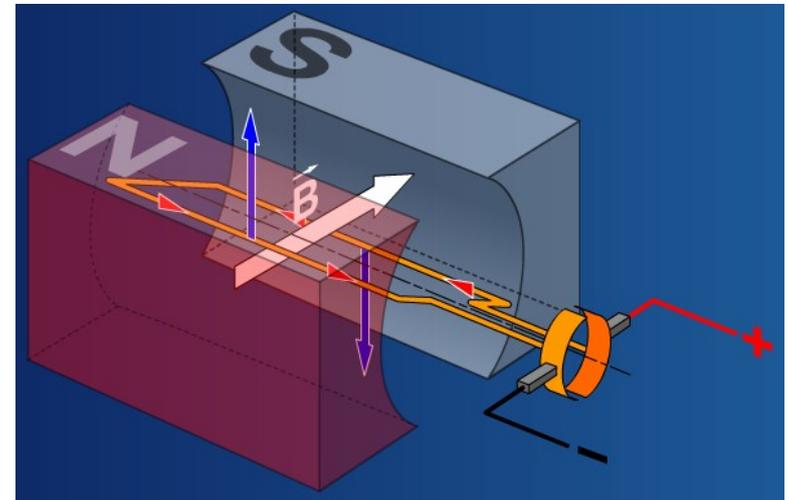
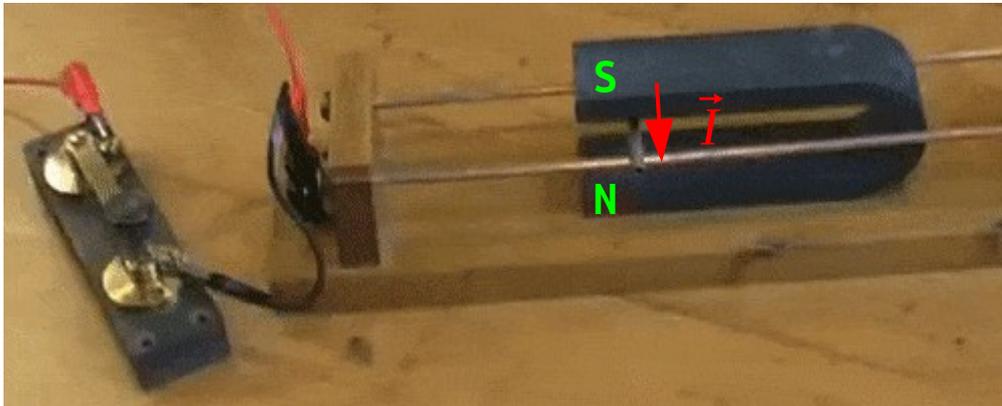
Stator (partie statique)



Un premier principe permettant d'expliquer la conversion électromécanique est la **force de Laplace** :

Tout conducteur de longueur l parcouru par un courant I , et plongé dans un champ magnétique d'induction B subira une force F orthogonale aux deux autres vecteurs.

$$\vec{F} = \vec{I} \cdot l \wedge \vec{B}$$



Un second principe permettant d'expliquer la conversion électromécanique est la **force magnétomotrice (f.m.m.)** :

Soient B_r représentant l'induction magnétique au rotor et B_s l'induction magnétique au stator, ces deux vecteurs vont alors chercher à s'aligner.

On distingue alors l'inducteur (que l'on pilote pour imposer une induction magnétique) et l'induit (qui se déplacera pour s'aligner sur l'inducteur).

Pour générer une force magnétomotrice (f.m.m.) tournante, trois procédés :

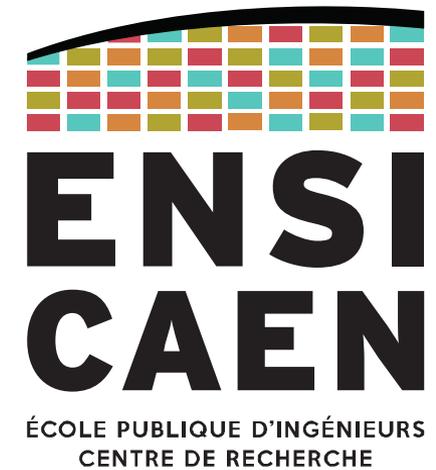
- Système monophasé DC mobile → onde tournante à Ω → MCC
- Système triphasé AC mobile à ω_r → onde tournante à $\Omega + \omega_r/p$ → MAS
- Système triphasé AC alimenté à ω_s → onde tournante à ω_s/p → MS

Pour réaliser cette conversion électrique → mécanique, trois familles de machines dominant le marché :

- Machine à Courant Continu (MCC)
 - Faible puissance à moyenne puissance, quasiment pas utilisée dans l'industrie
- Machine Synchrone (MS)
 - Faible puissance (*brushless*), moyenne à forte puissance, très répandue en motorisation et production
- Machine Asynchrone (MAS)
 - Moyenne à forte puissance, très répandue en motorisation mais en déclin dans le domaine de production

MACHINE À COURANT CONTINU

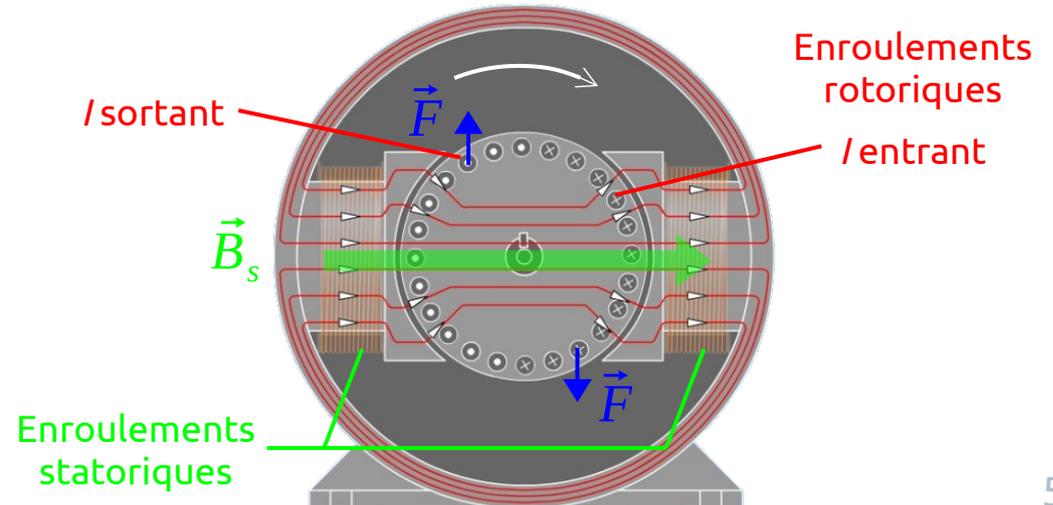
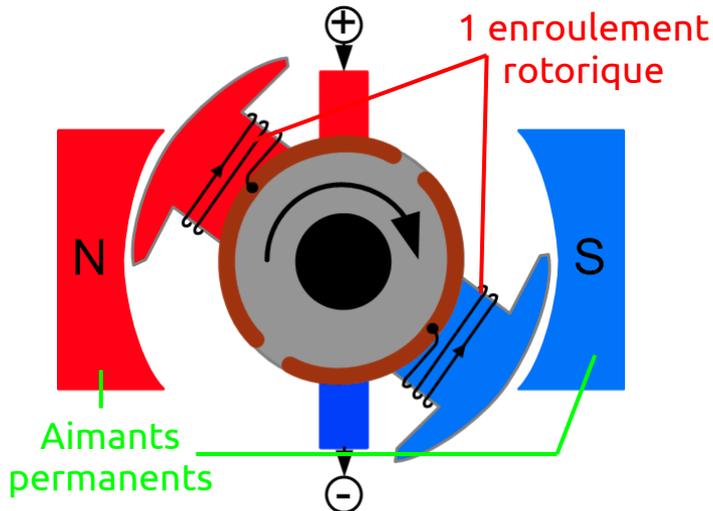
Brushed DC electric motor



Constitution

Le stator a le rôle d'**inducteur** (ou **excitation**): il impose un champ magnétique constant et immobile. Ce champ magnétique est généré par des aimants permanents (faible puissance) ou des enroulements (moyenne puissance).

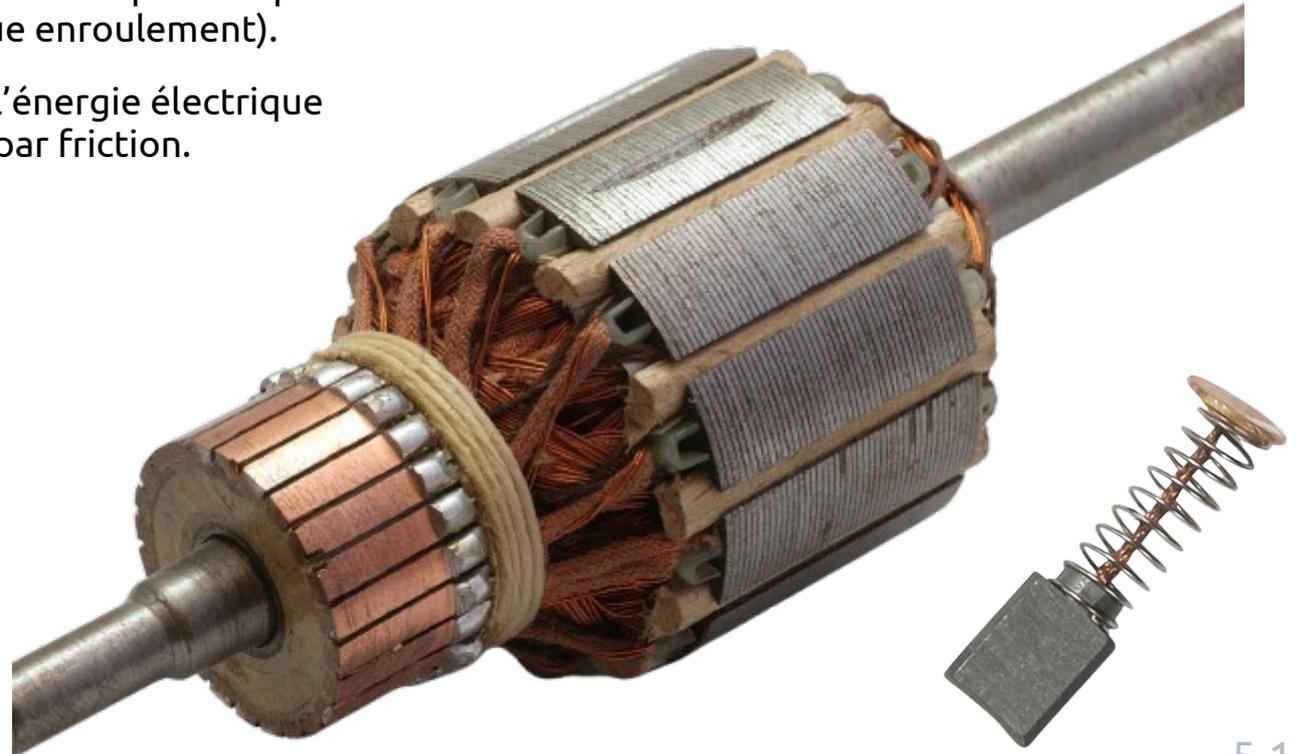
Le rotor a le rôle d'**induit**. Il est réalisé par plusieurs enroulements, tous décalés entre eux d'un angle constant.



L'alimentation des enroulements du stator se fait par un ensemble {collecteur + balais}.

Le collecteur est placé sur l'arbre du rotor. Il dispose de plusieurs contacts (un pour chaque pôle de chaque enroulement).

Les deux balais sont fixes et apportent l'énergie électrique du bornier de la machine au collecteur, par friction.



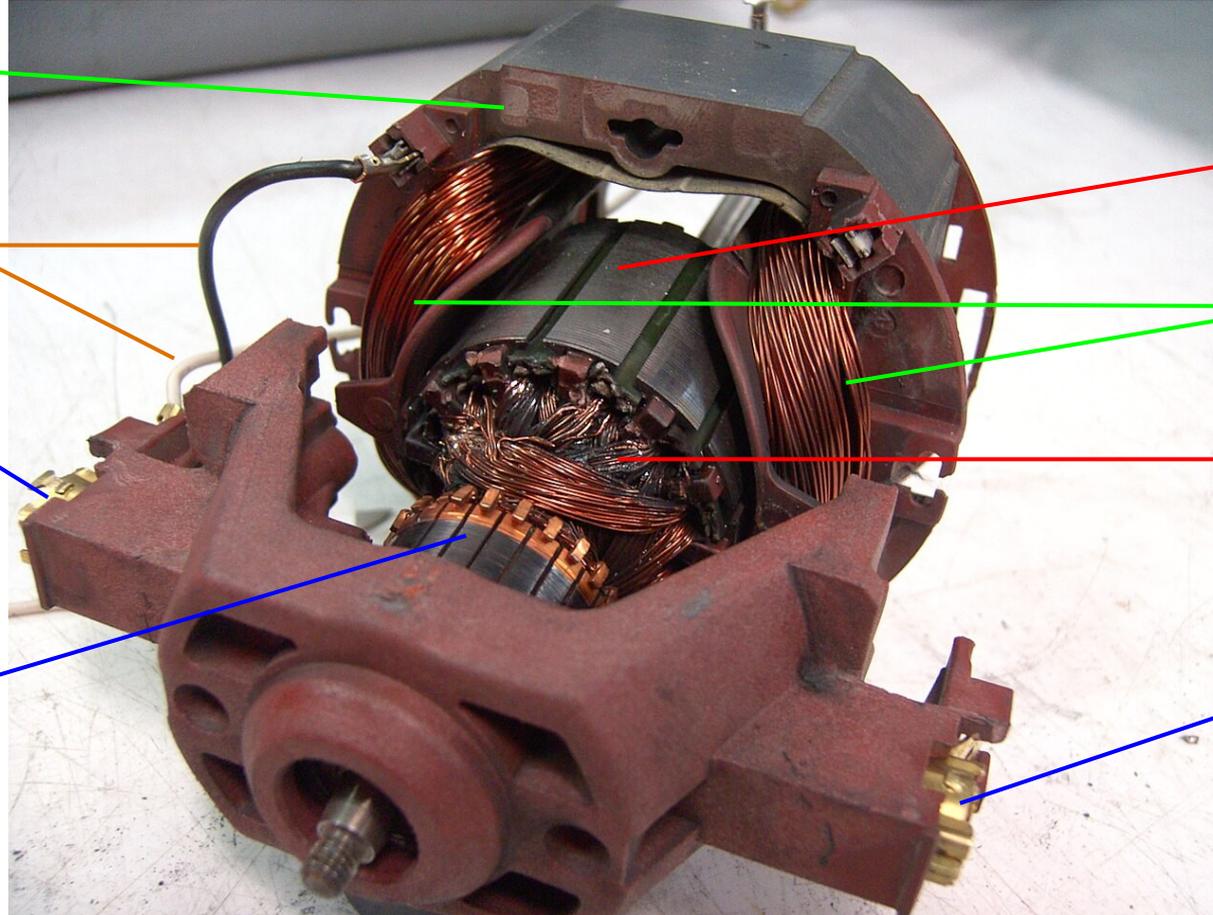
Constitution

Circuit magnét.
du stator

Excitation
série

Connecteur
du balai 1

Collecteur



Circuit magnét.
du rotor

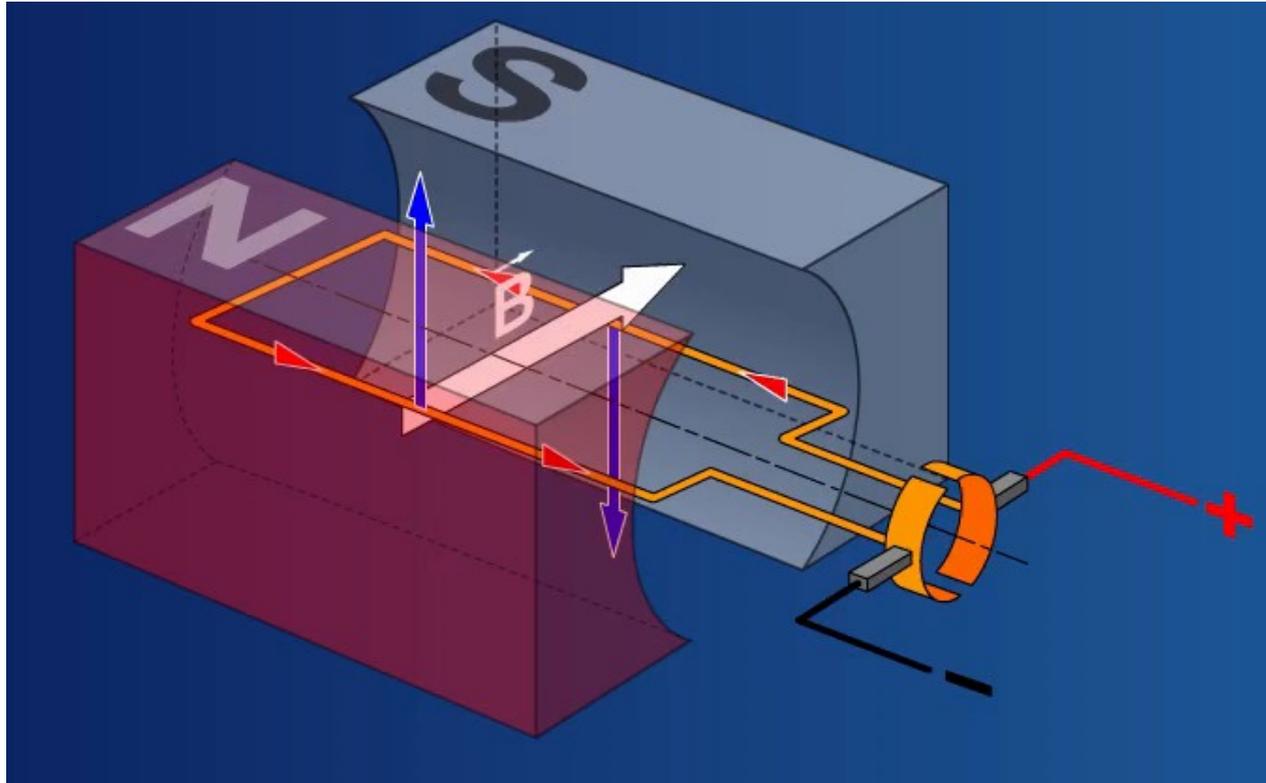
Enroulements
statoriques

Enroulements
rotoriques

Connecteur
du balai 2

MACHINE À COURANT CONTINU

Fonctionnement



Fonctionnement

Explication vidéo :

Quand l'excitation est en place, l'enroulement du rotor baigne dans un champ magnétique.

La mise sous tension continue de l'induit va alimenter l'enroulement du rotor. Un courant apparaît donc sur toute la longueur de l'enroulement, dans le sens aller puis le sens retour.

Le courant circulant dans le sens aller va créer une force de déplacement dans une direction, et le courant circulant dans le sens retour va créer une force de déplacement dans l'autre direction. Ces deux forces étant de part et d'autre de l'axe de rotation du rotor, un couple apparaît et le rotor se met à tourner.

Quand le rotor a pivoté de 90° , le collecteur de l'enroulement n'est plus en contact avec les balais. L'enroulement n'est plus alimenté mais l'inertie permet au rotor de tourner encore un peu.

À la suite de cela, le collecteur de l'enroulement entre de nouveau en contact avec les balais, mais la tension aux bornes de l'enroulement est inversée. Toutefois géométriquement, le courant circule dans le même sens qu'avant. Les forces de déplacement sont donc dans le même sens que précédemment et la machine continue à tourner tant que l'excitation est présente ou tant que l'induit est alimenté.

Note : Le couple varie en fonction de l'angle du rotor, et est maximal quand B_s et I sont orthogonaux. Pour disposer de plus de couple tout en le lissant, on dispose plusieurs enroulements à intervalles réguliers autour du rotor.

La force de Laplace entraînant la rotation est une fonction du courant d'induit I_i et de l'induction magnétique d'excitation B_s (et donc du flux magnétique statorique ϕ_s).

On note alors le couple électromécanique C_{em} du rotor :

$$C_{em} = k \cdot \phi_s \cdot I_i = k_\phi \cdot I_i$$

L'enroulement rotorique se déplace dans un flux magnétique fixe et constant.

Il apparaît donc aux bornes de l'enroulement rotorique un $f_{cem}^{(*)}$ E proportionnelle au flux magnétique ϕ_s et à la vitesse de déplacement, et donc à la vitesse de rotation Ω_r ,

$$E = k \cdot \phi_s \cdot \Omega_r = k_\phi \cdot \Omega_r$$

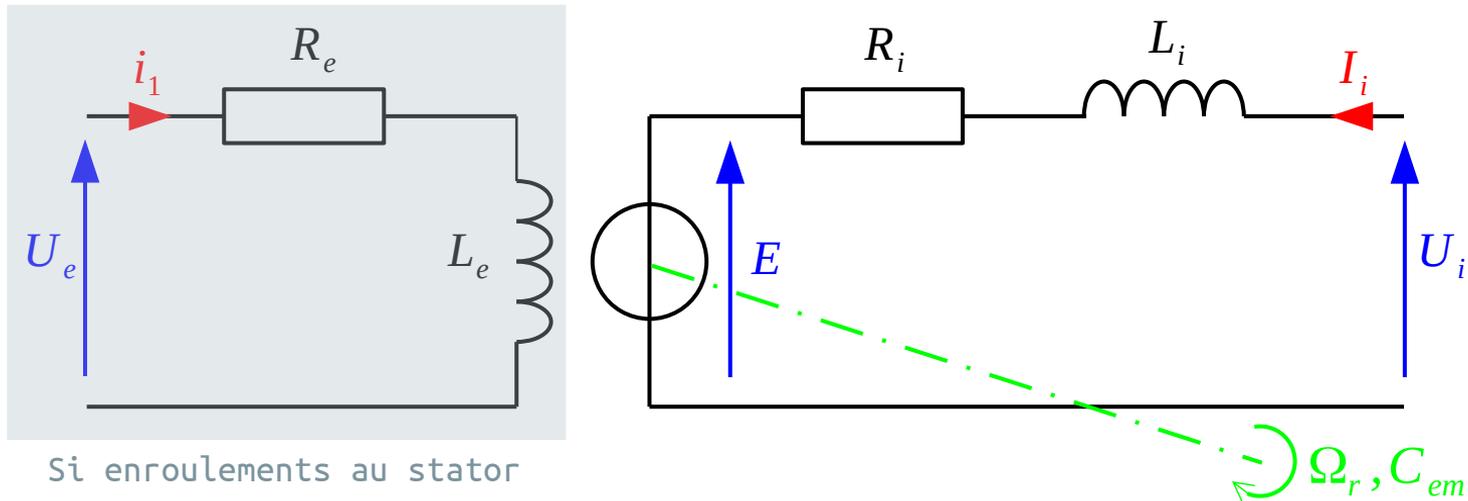
(*) force contre-électromotrice, car elle va à l'encontre de la tension d'alimentation de l'induit.

Modélisation

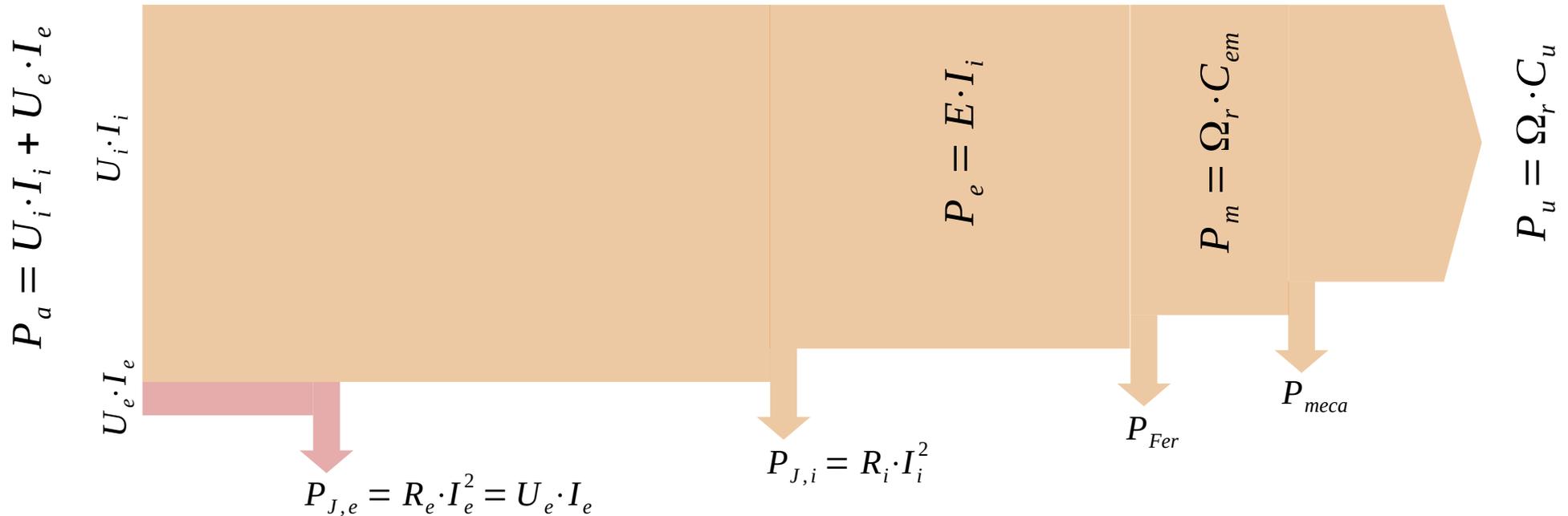
Il est démontré que la constante k est la même pour les deux équations précédentes, ce qui permet d'écrire :

$$P_e = E \cdot I_i = \Omega_r \cdot C_{em} = P_m$$

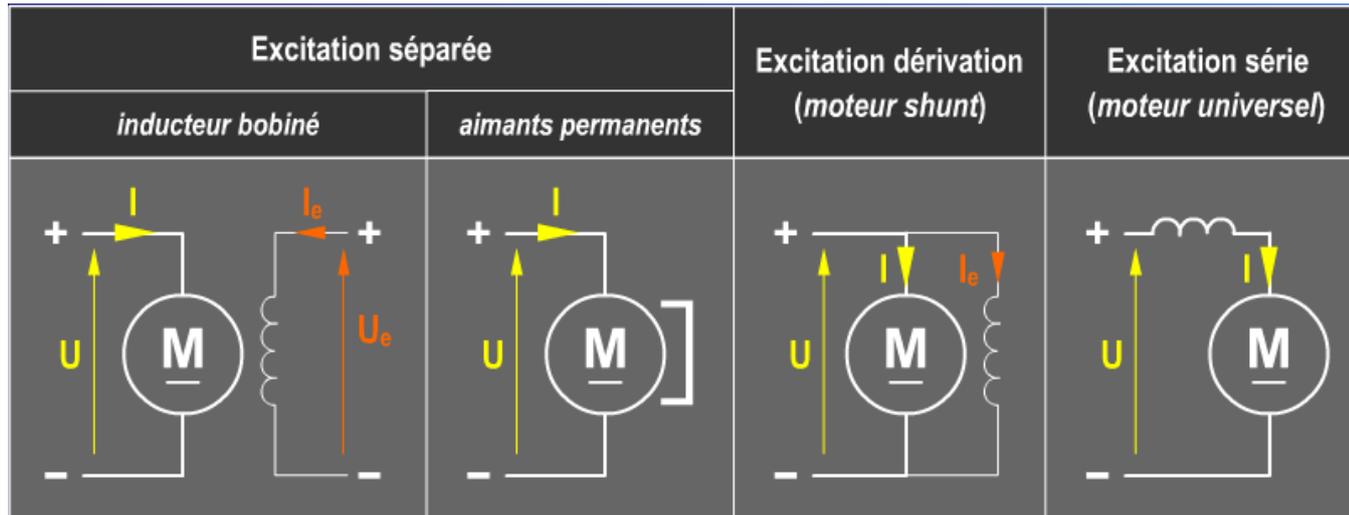
On donne le schéma équivalent pour la MCC :



Bilan de puissance d'une machine à courant continu fonctionnant en excitation séparée.

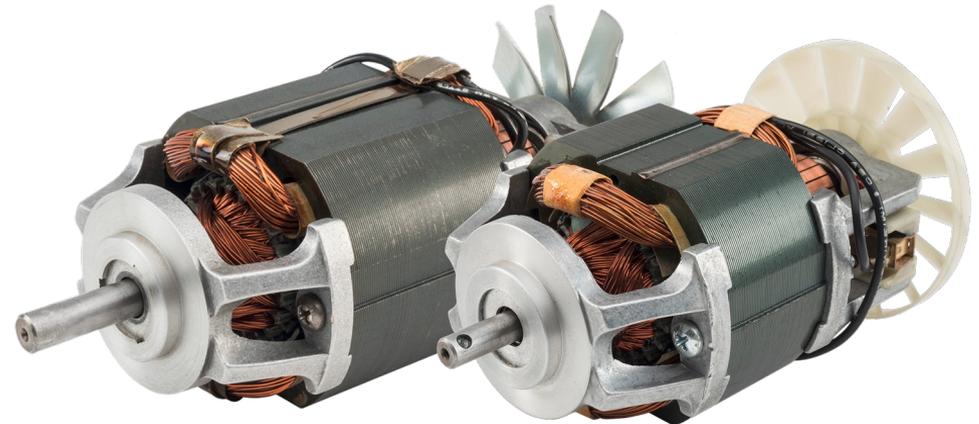


Dans le cas d'une MCC à enroulements statoriques, il est possible d'alimenter le rotor et le stator avec la même source de tension.



À noter que pour une machine à excitation série, l'alimentation peut se faire soit en DC, soit en AC. En effet, lors de l'alternance négative le sens de l'induction magnétique au stator et celui du courant dans le rotor s'inversent en même temps. Ainsi le rotor tourne toujours dans le même sens.

Ceci s'appelle le **moteur universel** et est utilisé dans un grand nombre d'appareils de faible puissance (électroménager, outillage électroportatif, ...).



Avantages

Constitution très simple

Pilotage très simple ($\Omega \propto U$)

Très facilement réversible (dynamo)

Inconvénients

Mauvais rendement (~ 60%)

Balais + collecteur → arc électriques

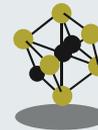
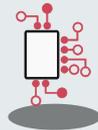
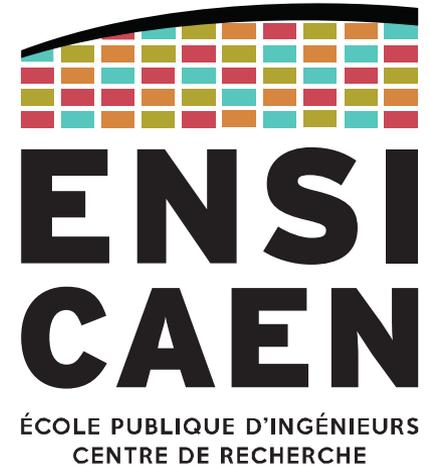
Usure des balais → maintenance importante

Défrettage à haute vitesse (force centrifuge sur les enroulements)

De part ces caractéristiques, la MCC se trouve exclusivement dans des applications grand-public, basse-puissance et faible coût.

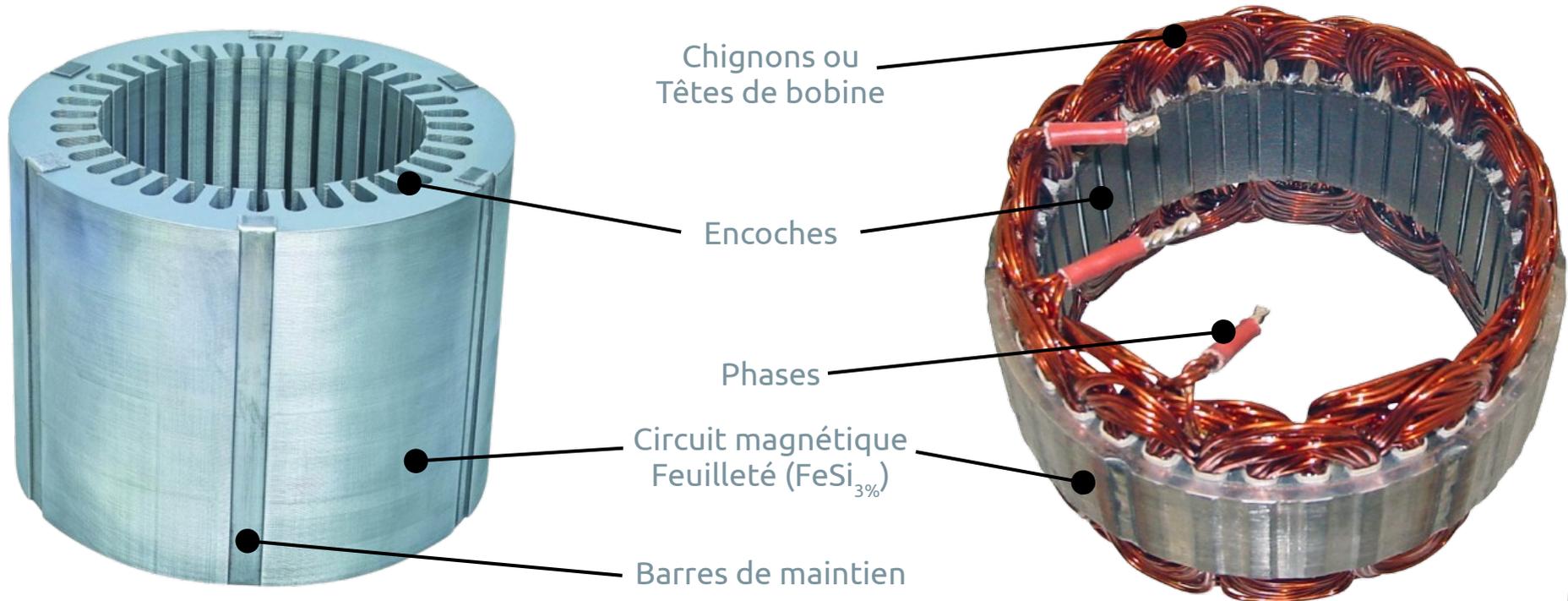
MACHINES TRIPHASÉES

Généralités sur les machines triphasées : MS et MAS



Stator

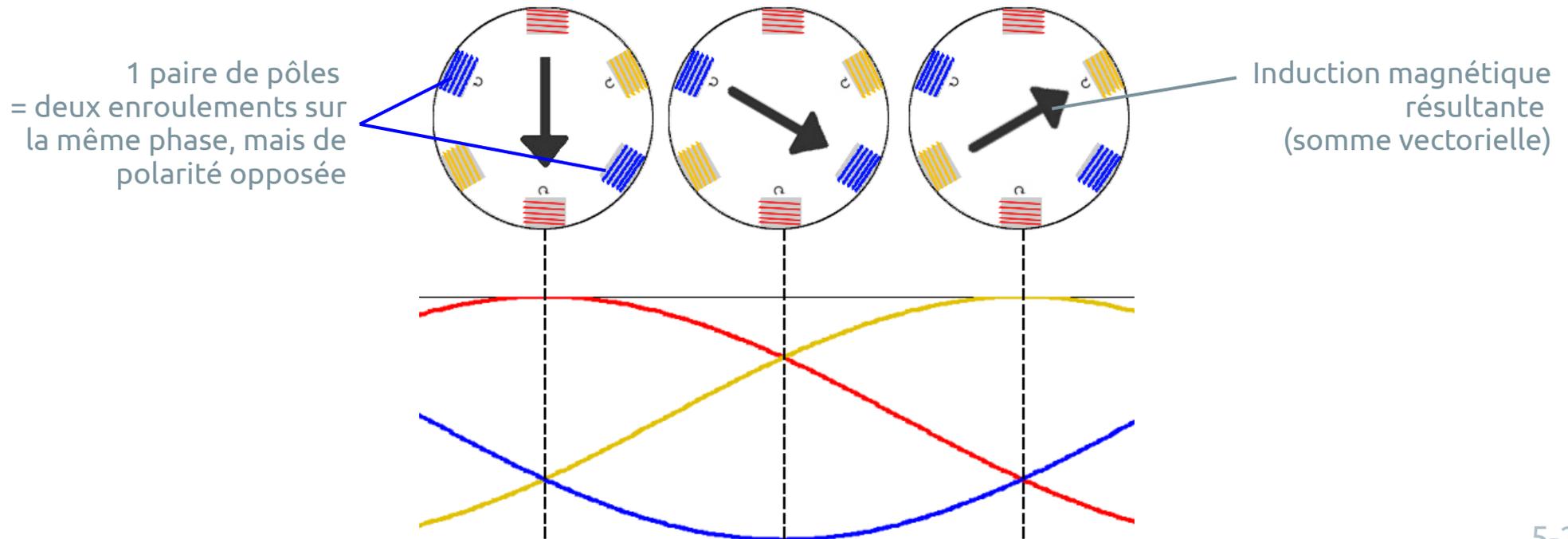
À puissance, nombre de paires de pôles, dimensions ... équivalents, les machines électriques triphasées (MS et MAS) possèdent le même stator.



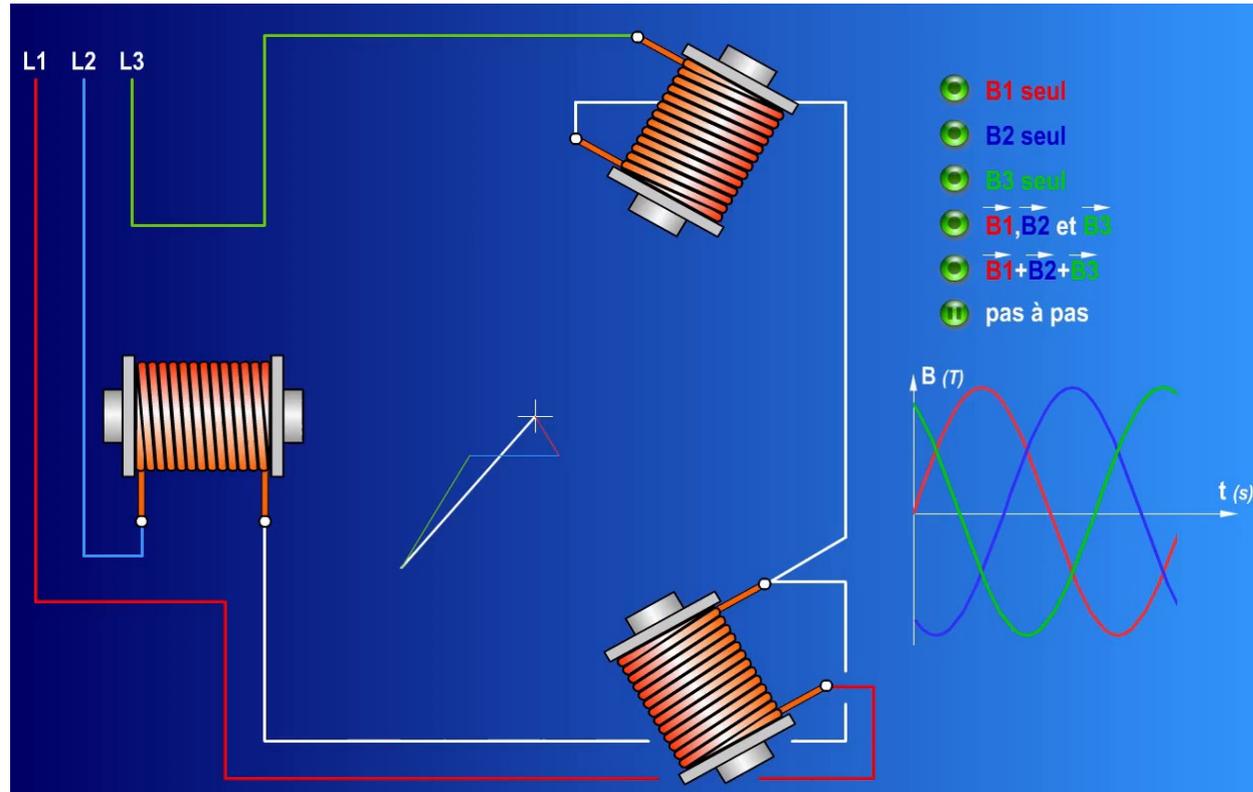
Champ tournant

En fonctionnement moteur, le rôle du stator est de générer un **champ magnétique tournant** à partir d'un système triphasé de courants. Ce fonctionnement est réversible.

6 encoches – 3 phases – 1 paire de pôles



Champ tournant

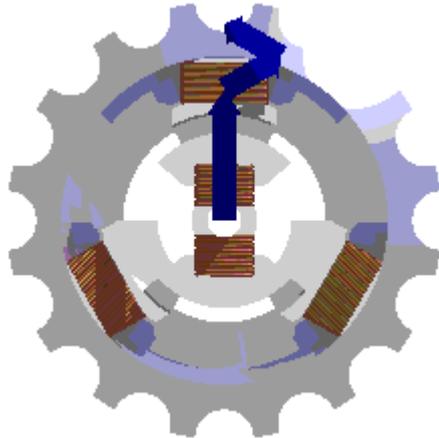


Champ tournant

La différence entre la machine synchrone et l'asynchrone est au niveau du rotor.

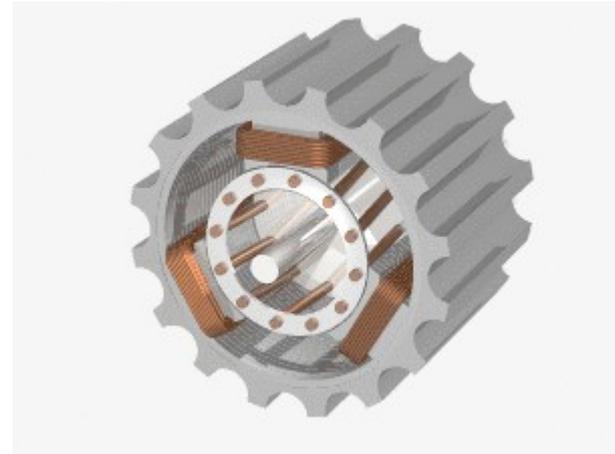
Dans une MS, le rotor est magnétiquement actif. Il génère un champ magnétique soit avec un bobinage alimenté en DC, soit avec des aimants permanents.

Le champ magnétique du rotor tourne à la même vitesse que celui du stator (synchrone).



Dans une MAS, le rotor est magnétiquement passif. Il génère une induction magnétique grâce aux courants de Foucault créés dans son circuit magnétique.

Le champ magnétique du rotor tourne plus lentement que celui du stator (asynchrone).



Champ tournant et paires de pôles

On désigne par p le nombre de paires de pôles magnétiques présents au rotor (*).

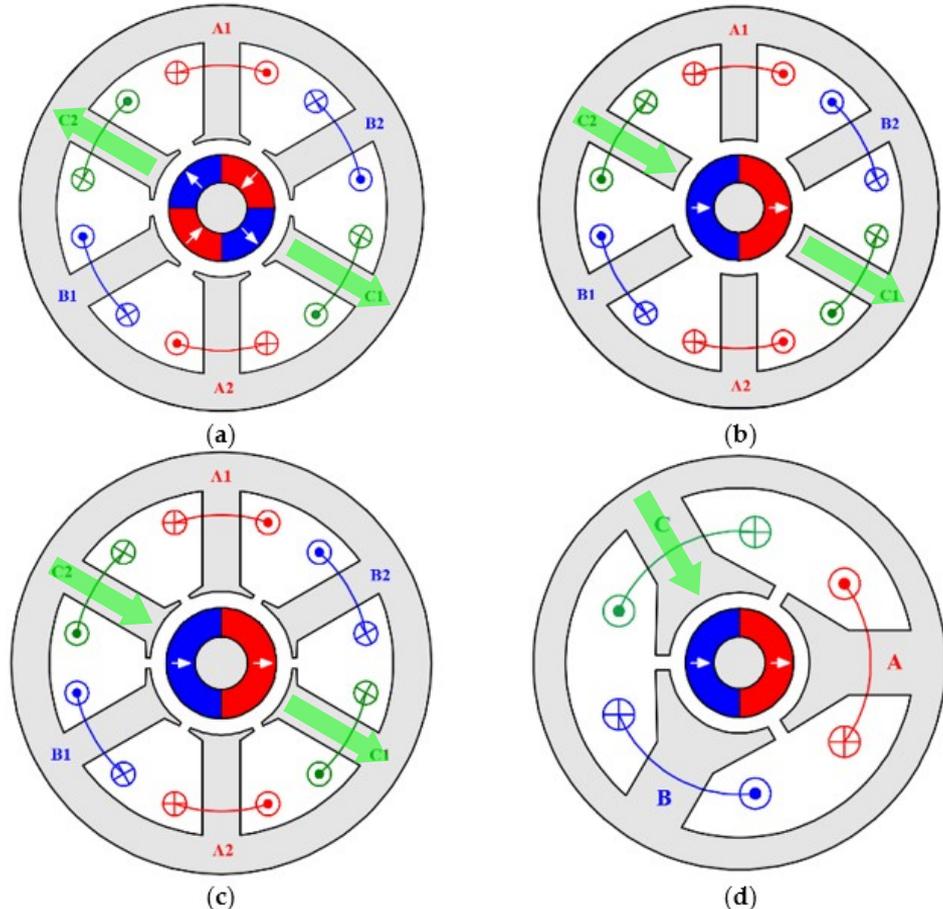
- (a) 6 encoches, 2 paires de pôles (b) 6 encoches, 1 paire de pôles
 (c) 6 encoches, 1 paire de pôles (d) 3 encoches, 1 paire de pôles

Dans (a), tous les enroulements d'une phase sont bobinés dans le même sens (symétrie centrale). Ainsi les inductions créées sont de sens opposés.

Dans (b) et (c), les enroulements d'une phase sont bobinés à l'envers une fois sur deux (symétrie axiale). Ainsi les inductions créées sont de sens identiques.

Dans (d), un seul enroulement par phase

(*) On utilise ici la notation francophone : p = nombre de paires de pôles.
 Dans les notations anglophones, p = nombre de pôles.



Champ tournant et paires de pôles

La vitesse du champ tournant au stator est liée au nombre de paires de pôles p .

Dans (c) (1 paire de pôles) la force magnétomotrice tourne de 360° en une période d'alimentation.

Dans (a) (2 paires de pôles) la force magnétomotrice tourne de 180° en une période d'alimentation, mais il y a deux f.m.m..

On a donc : $\Omega_s = \omega_s / p$

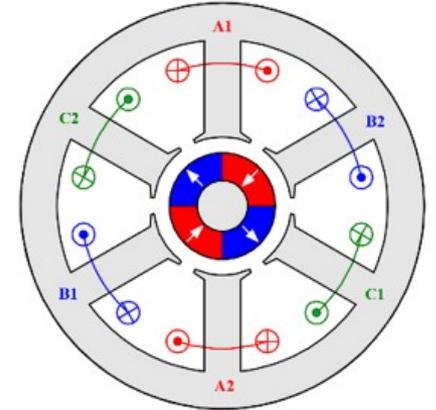
Ω_s : vitesse de rotation du champ statorique [rad/s]

ω_s : pulsation des courants statoriques [rad/s]

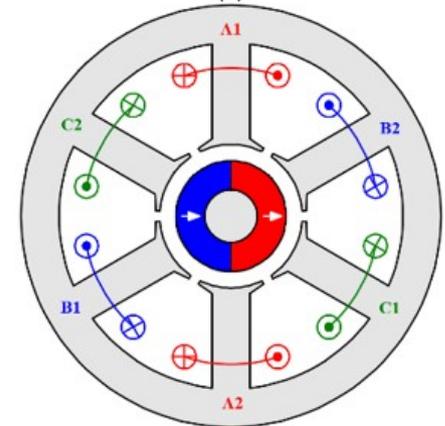
p : nombre de paires de pôles

En augmentant le nombre de paires de pôles :

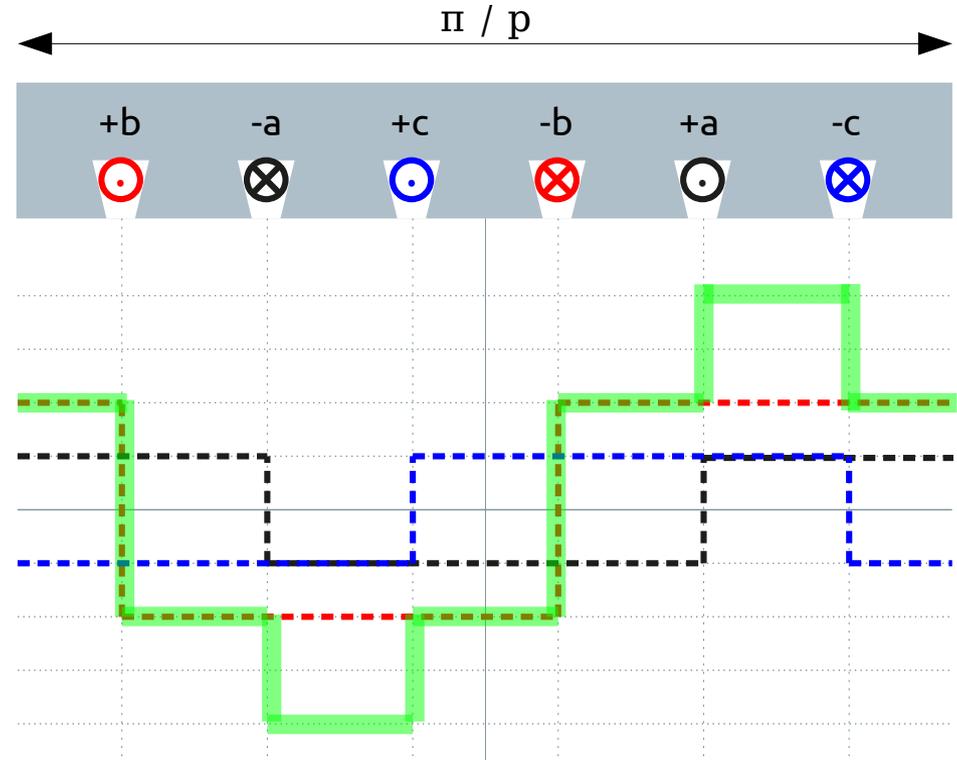
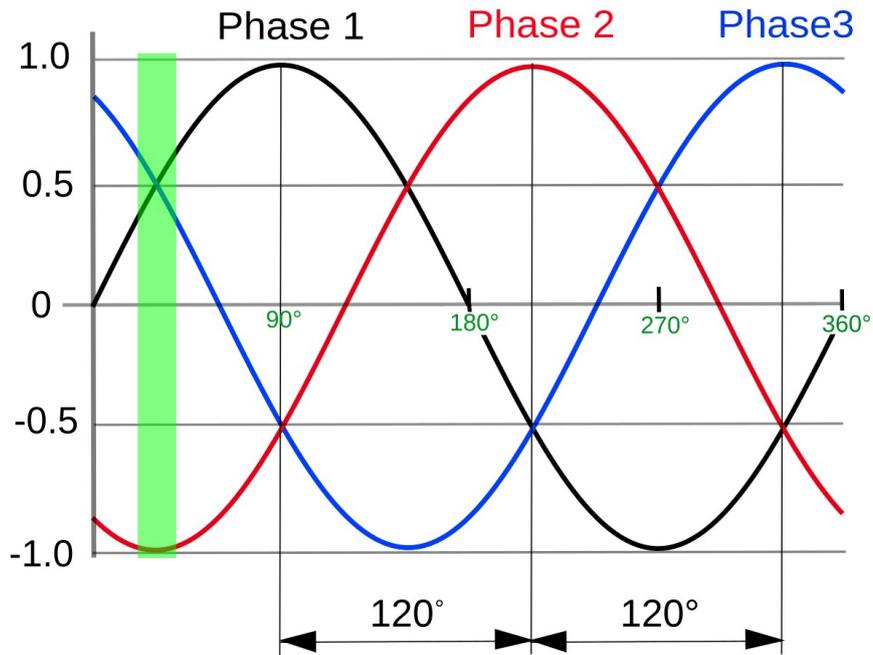
- On diminue la vitesse de rotation de la f.m.m. (et *in fine* de l'arbre)
- On augmente l'intensité de la f.m.m. (et *in fine* le couple de l'arbre)

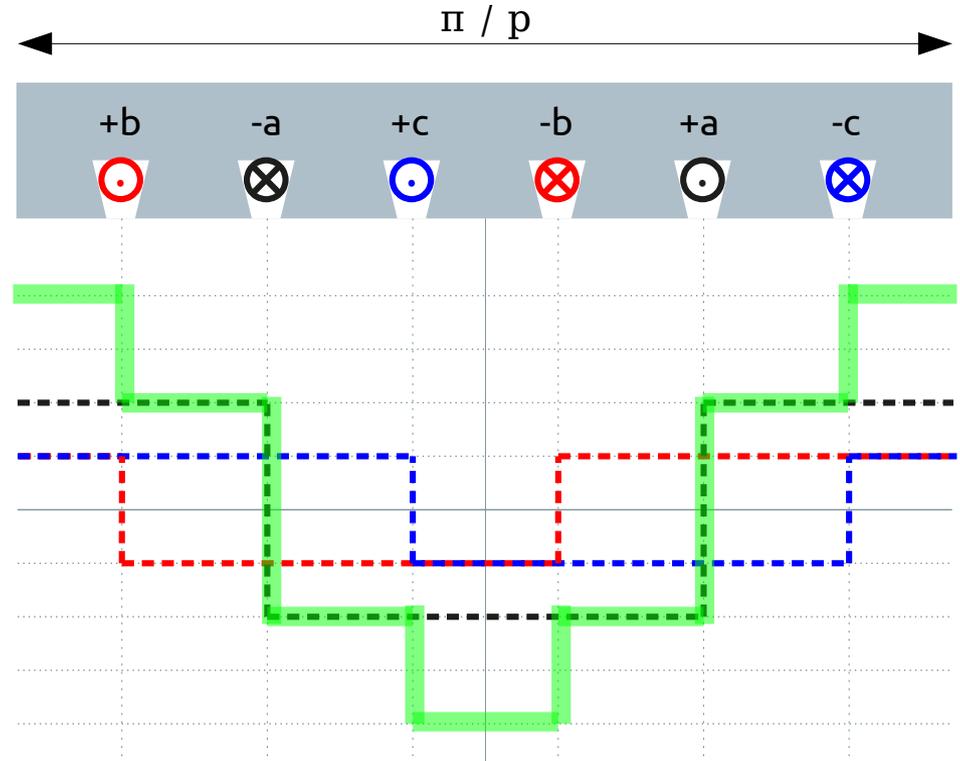
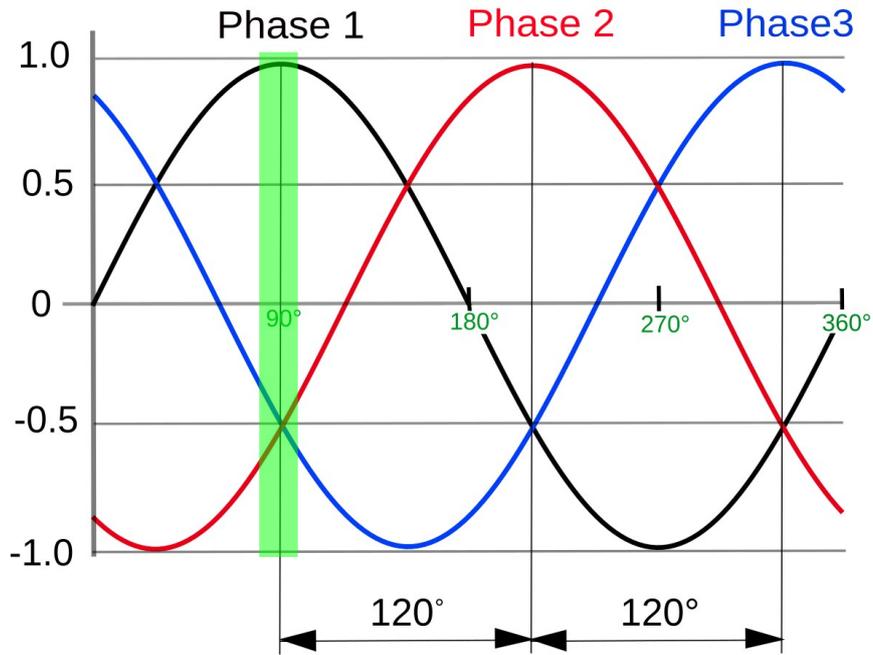


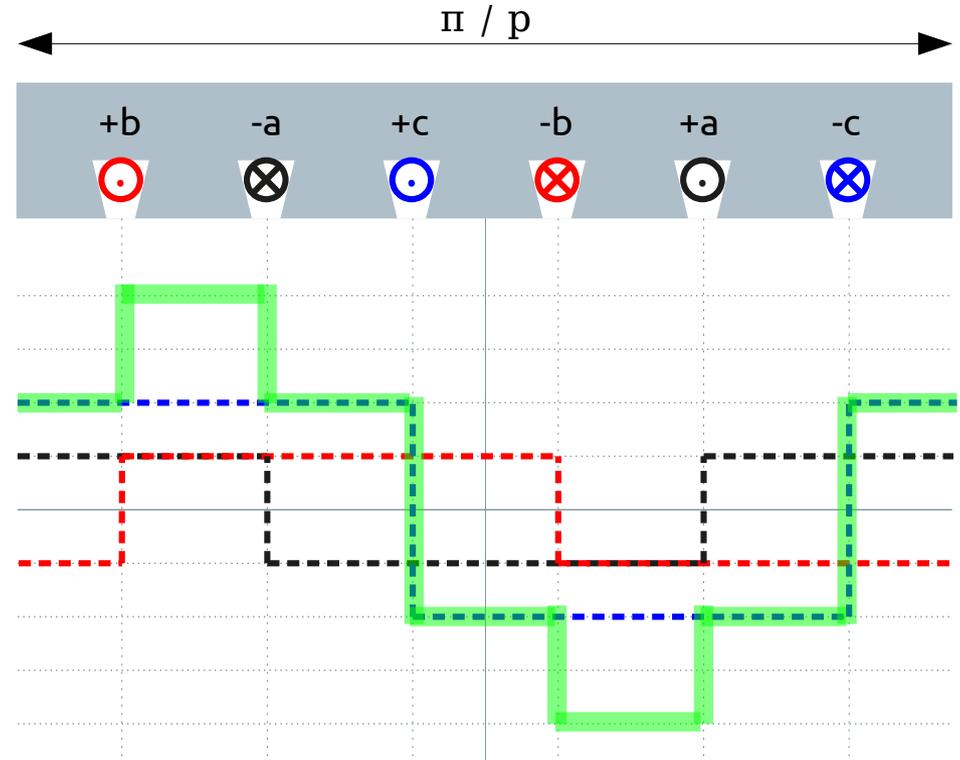
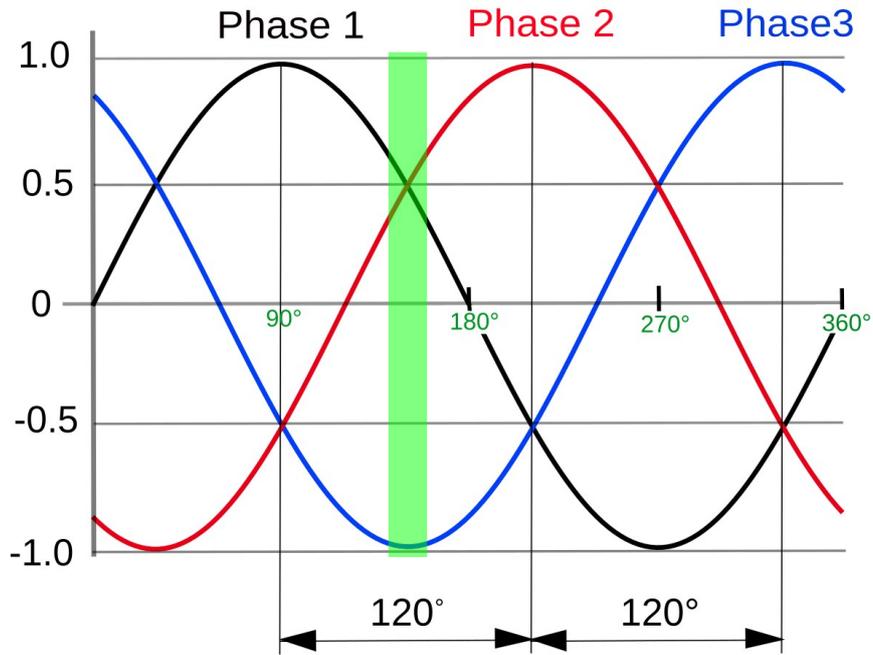
(a)

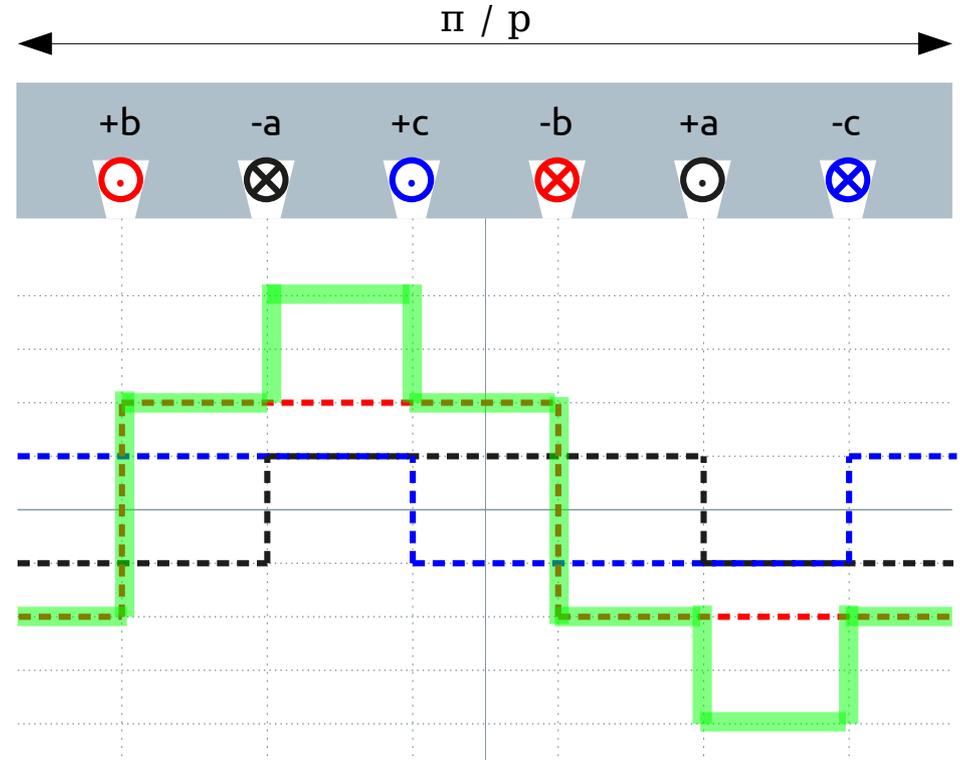
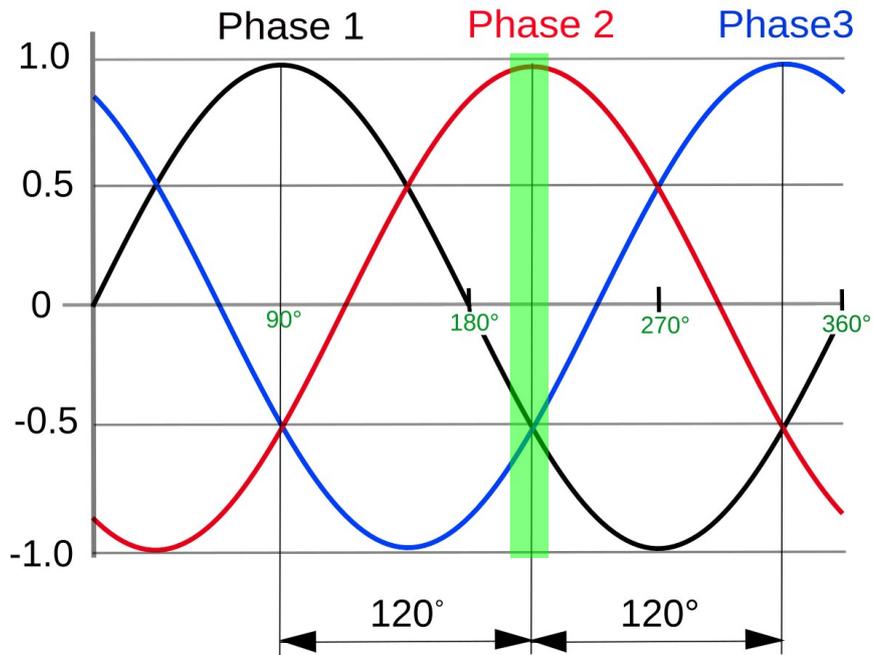


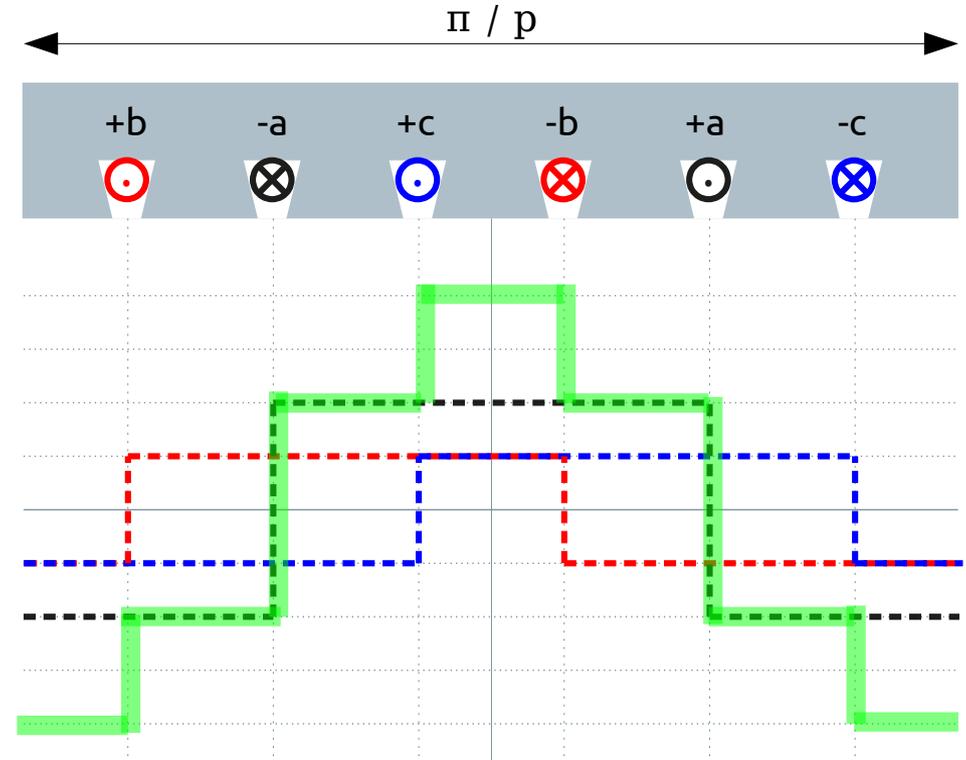
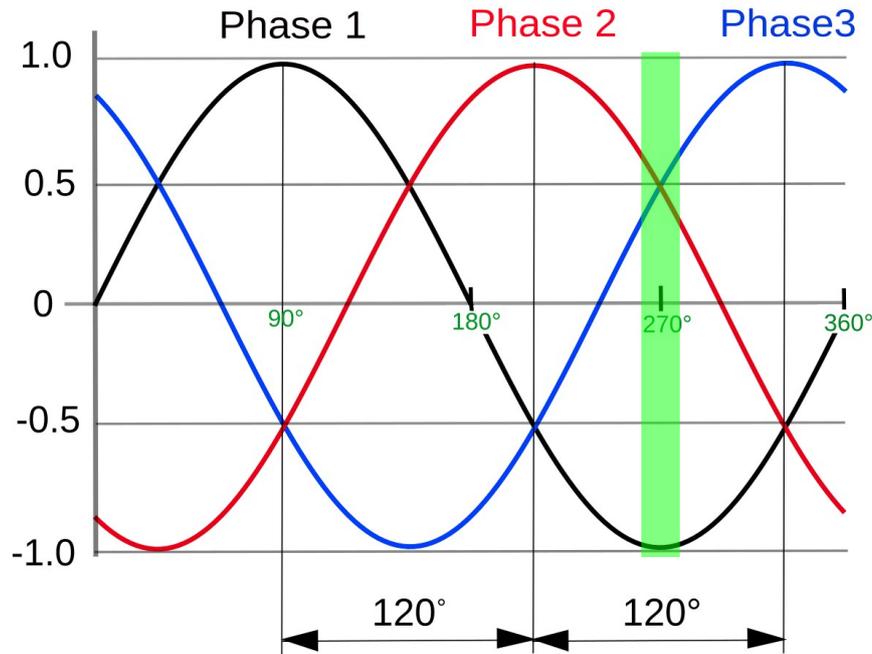
(c)

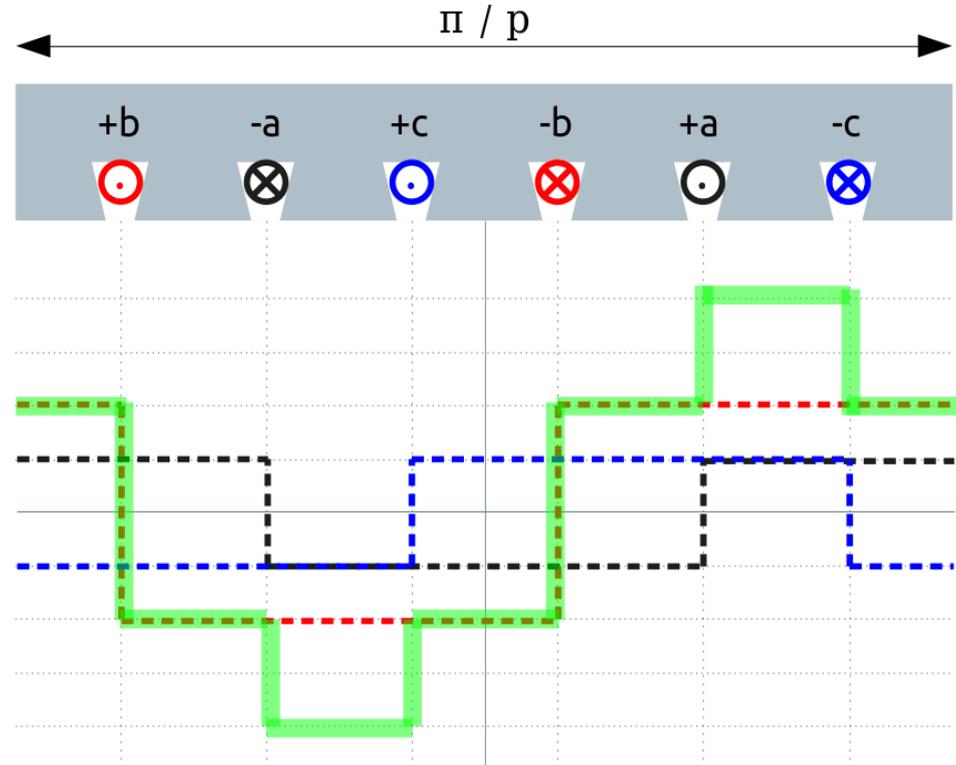
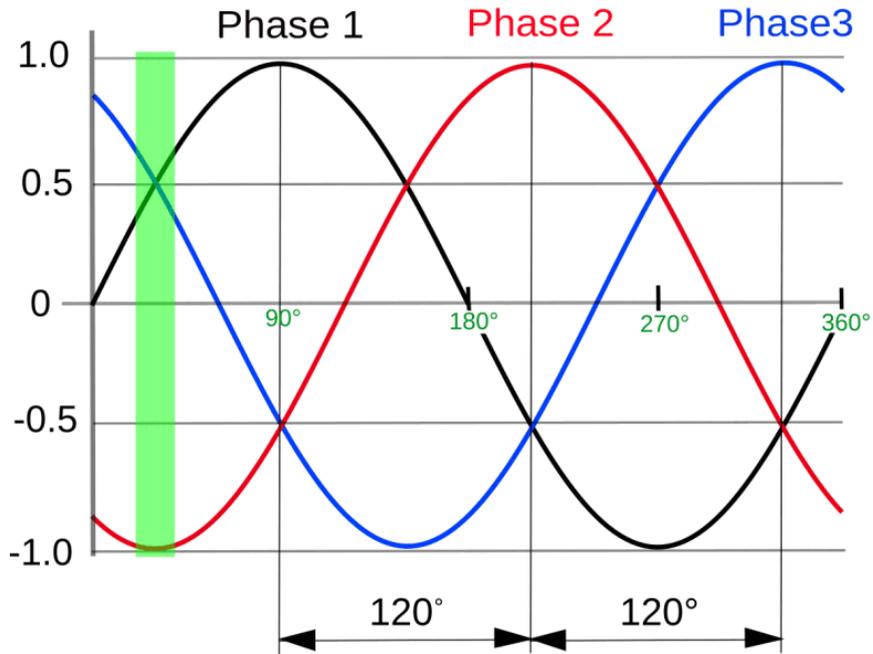












Techniques de lissage de la f.m.m. : Distribution du bobinage

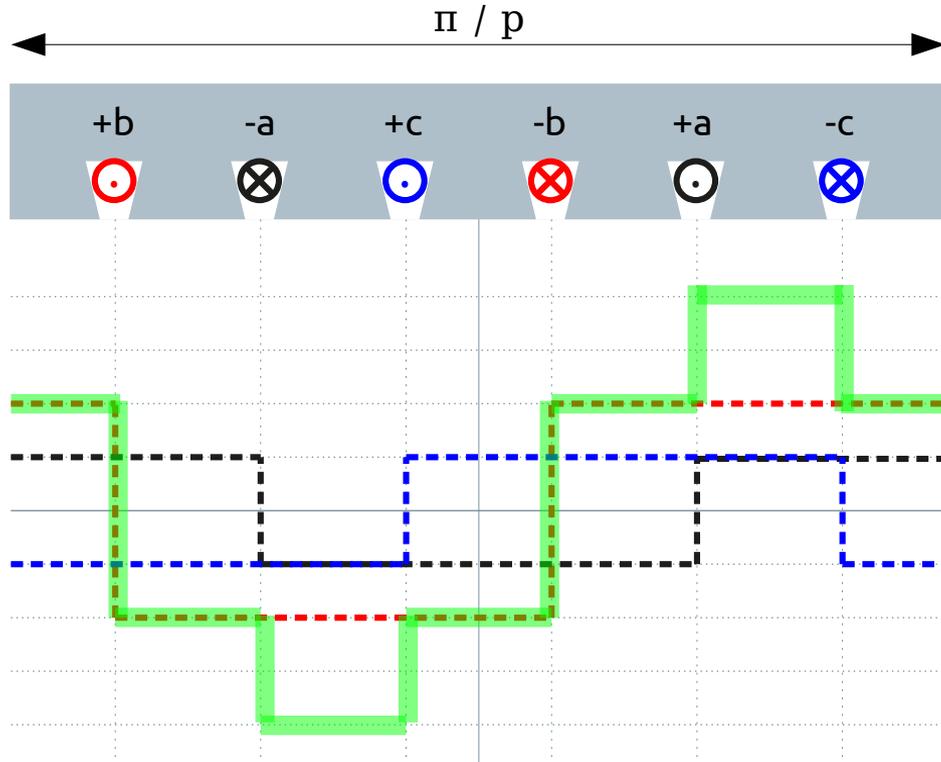
Que ce soit pour la MAS ou la MS, il faut générer un champ tournant au stator de sorte à obtenir un f.m.m. tournante.

Or pour avoir un mouvement de rotation constant (et sans à-coup), l'onde tournante doit être la plus sinusoïdale possible.

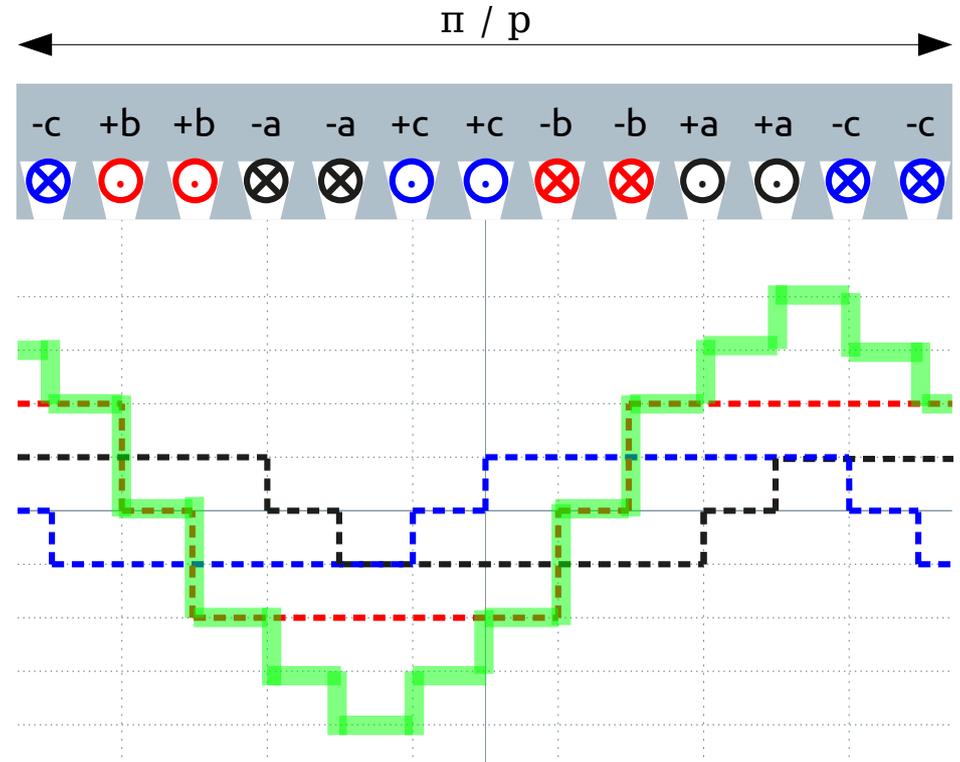
Pour cela plusieurs solutions technologiques ont été mises en œuvre pour y parvenir :

- Distribution du bobinage (au stator)
- Décalage (ou raccourcissement) du bobinage (au stator)
- Inclinaison (au rotor pour MAS)

Techniques de lissage de la f.m.m. : Distribution du bobinage



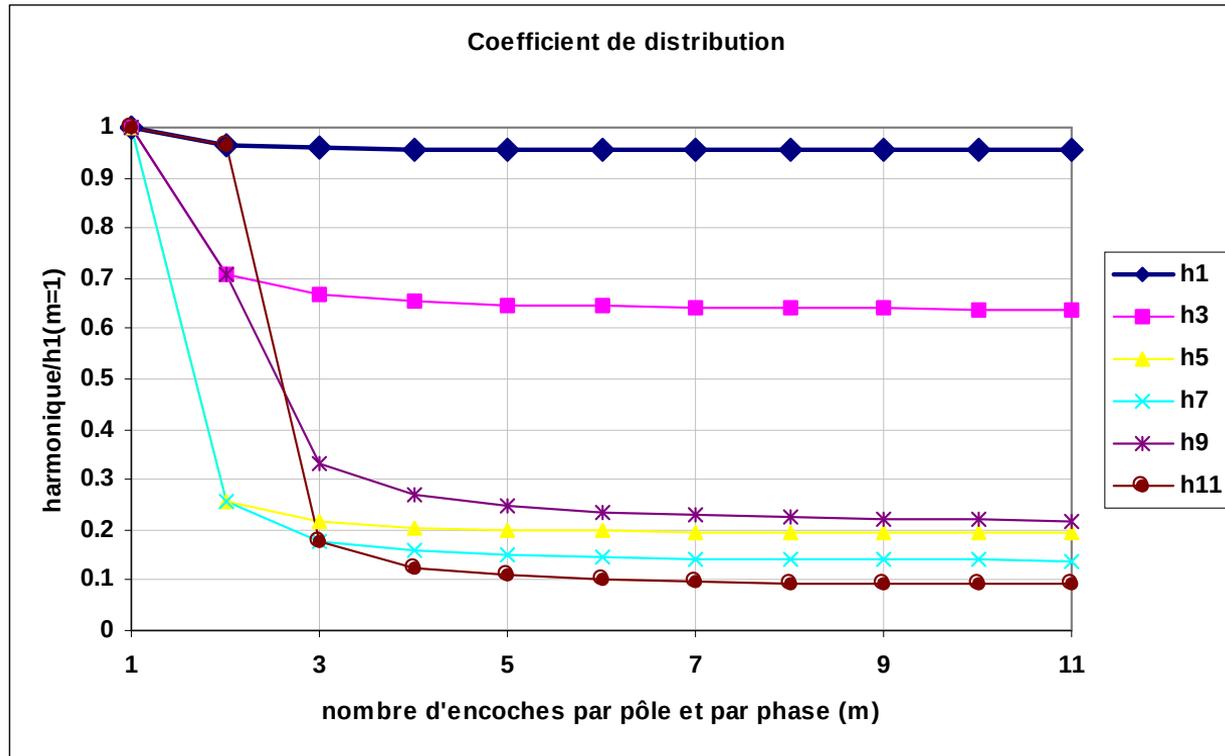
Bobinage concentré
 $m = 1$ (= nombre d'encoches / pôle / phase)



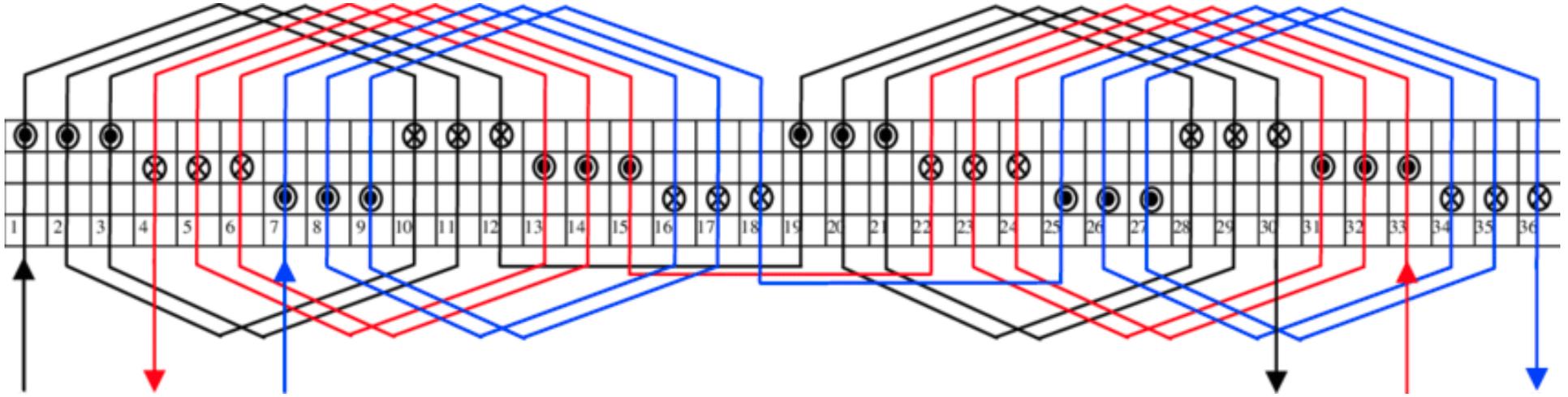
Bobinage distribué
 $m = 2$ (= nombre d'encoches / pôle / phase)

Techniques de lissage de la f.m.m. : Distribution du bobinage

La distribution de bobinage permet d'éliminer les harmoniques de la f.m.m. et donc de la rendre plus sinusoïdale.



Techniques de lissage de la f.m.m. : Distribution du bobinage



Bobinage
concentré

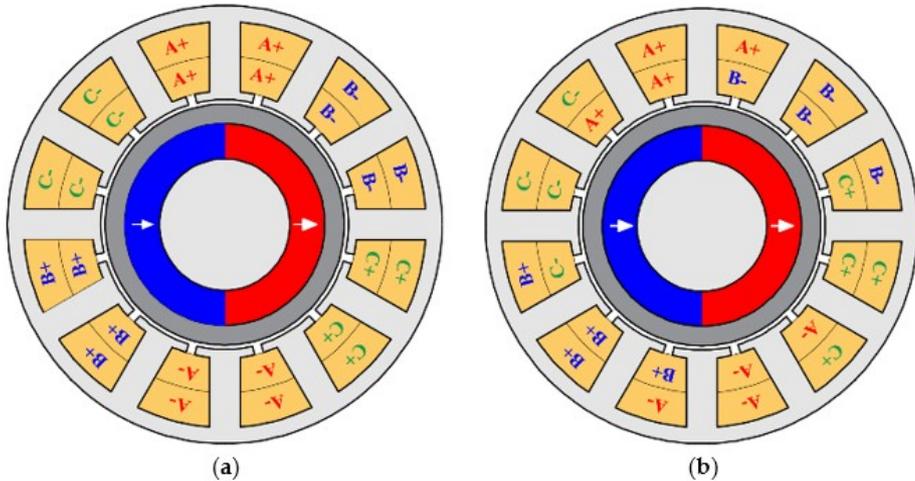


Bobinage
distribué

Techniques de lissage de la f.m.m. : Décalage du bobinage

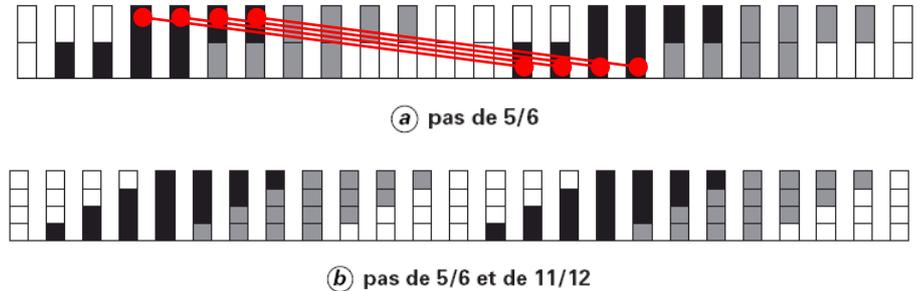
Un enroulement est constitué de plusieurs spires par encoche.

Le décalage du bobinage consiste à décaler une partie du bobinage, d'un certain nombre d'encoches.



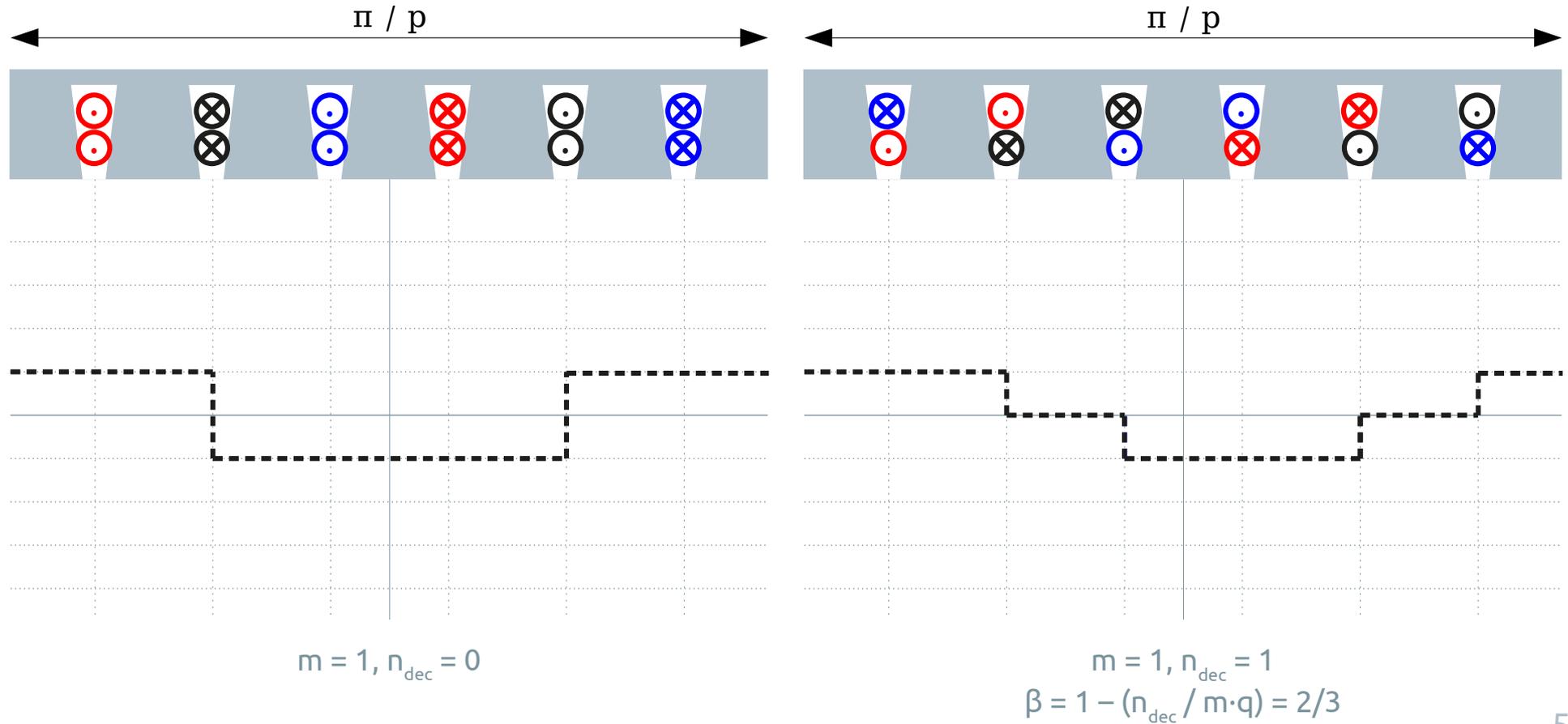
(a)
Distribué ($m = 2$)
Non décalé ($n_{dec} = 0$)

(b)
Distribué ($m = 2$)
Décalé ($n_{dec} = 1$)



On note $\beta = 1 - (n_{dec} / m \cdot q)$ le pas de décalage

Techniques de lissage de la f.m.m. : Décalage du bobinage



Techniques de lissage de la f.m.m. : Inclinaison au rotor

Uniquement dans le cas de la MAS.

Pour filtrer les harmoniques hautes fréquences, les conducteurs du rotor sont inclinés d'un angle égal à celui d'entre deux encoches du stator.



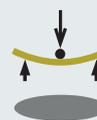
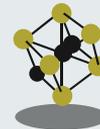
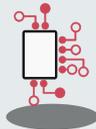
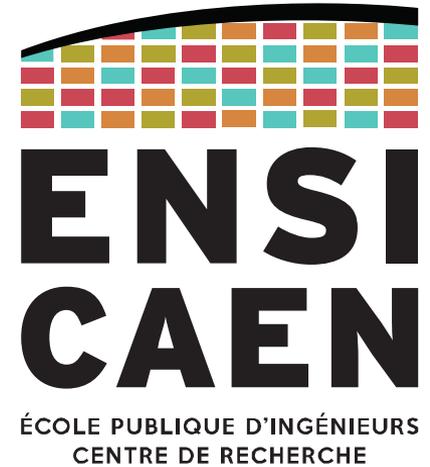
Rotor bobiné



Rotor à cage d'écureuil

MACHINE ASYNCHRONE

Induction machine

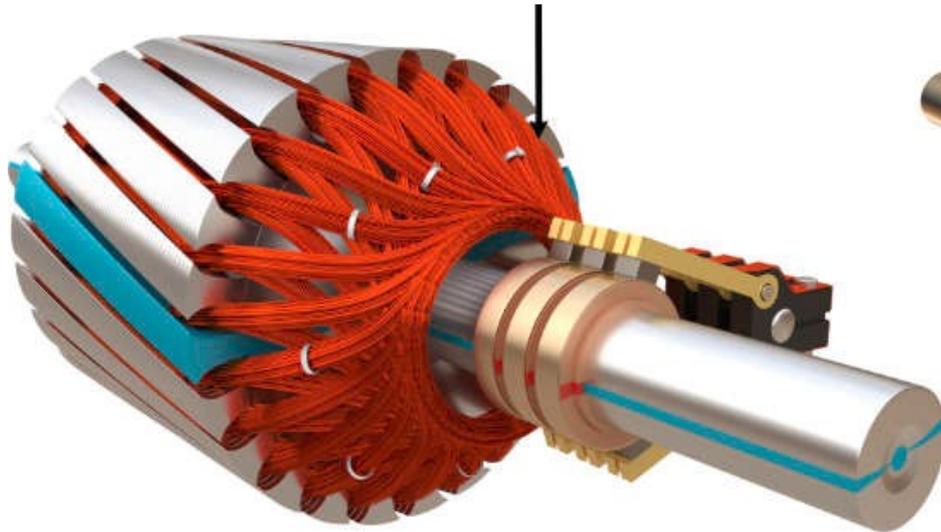


Rotor

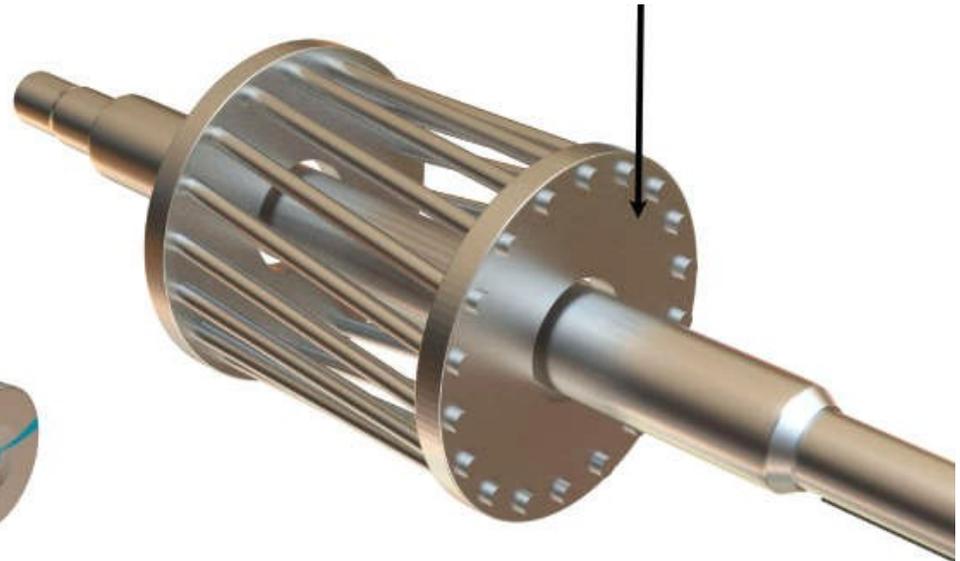
Pour les Machines Asynchrones (MAS), le stator a le rôle d'inducteur (il impose un champ magnétique) et le rotor a le rôle d'induit (il en subit les effets).

Il existe deux types de rotor :

Rotor bobiné (ou rotor à bagues)



Rotor à cage (ou à cage d'écureuil)

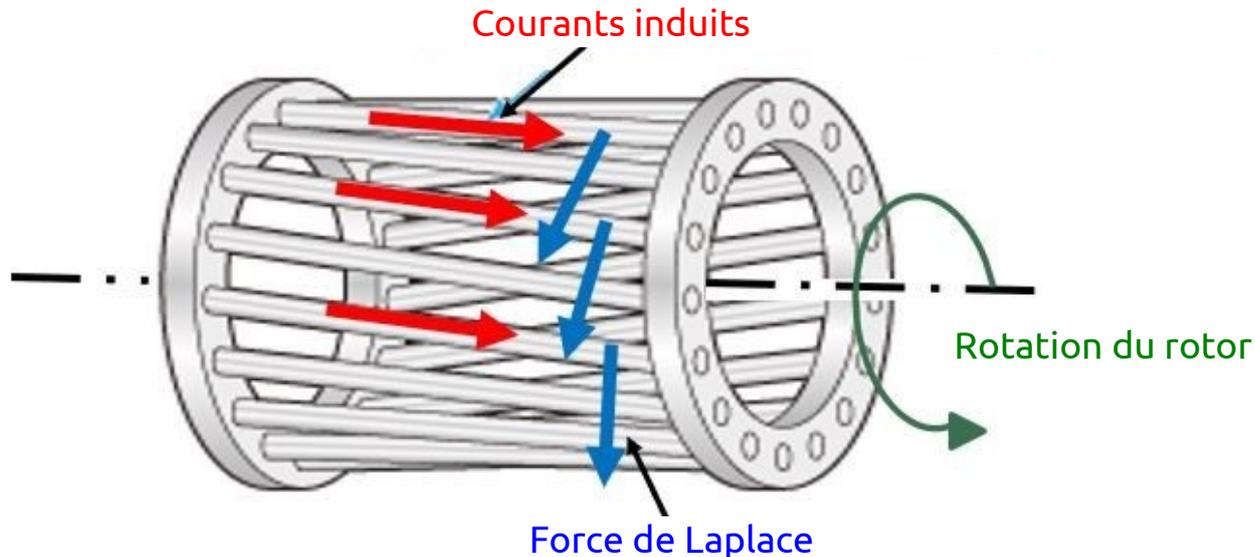


Rotor à cage

Le **rotor à cage (ou à cage d'écureuil)** est de loin le plus rencontré.

Il est constitué de barres conductrices (cuivre ou aluminium) dans la longueur du rotor, toutes mises en court-circuit par un anneau conducteur à chaque extrémité.

Ces barres conductrices, soumises à un flux magnétique variable, vont voir apparaître une force électromotrice leurs bornes et vont ainsi être parcourues par des courants de Foucault. Elles vont alors subir des forces de Laplace, provoquant le déplacement des barres et donc la rotation du rotor.



Rotor à cage

Le rotor contient également un circuit magnétique, constitué de tôles FeSi_{3%} laminées.

FeSi_{3%} pour sa perméabilité magnétique, laminé pour limiter les pertes de Foucault dans le circuit magnétique.



Une feuille du CM au stator et au rotor →
Le nombre d'encoches est différent (ci-contre, 36 au stator et 40 au rotor) de sorte à éviter le verrouillage magnétique.
Encoches peu profondes, profondes (profite de l'effet de peau) ou à double cage.



← Coupe d'un rotor à cage

Pour construire un rotor à cage, deux solutions :

- 1) on construit la cage et on insère les tôles une à une
- 2) on construit le circuit magnétique tôle par tôle, et on coule les barres conductrices dedans.

Circuit
magnétique

Tôle laminée
(FeSi_{3%})

Encoche

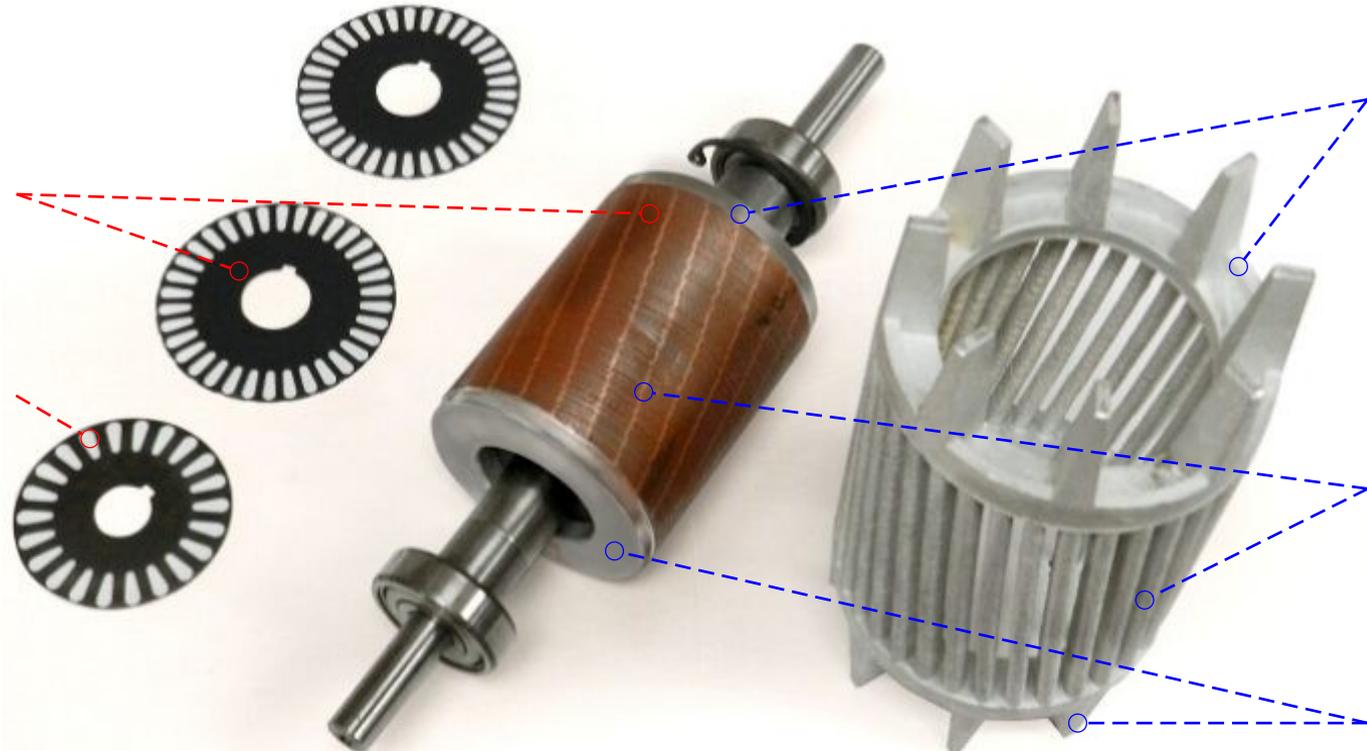
Rotor complet

Cage d'écureuil

Anneau conducteur
(alu ou cuivre)

Barres conductrices
(alu ou cuivre)

Anneau conducteur



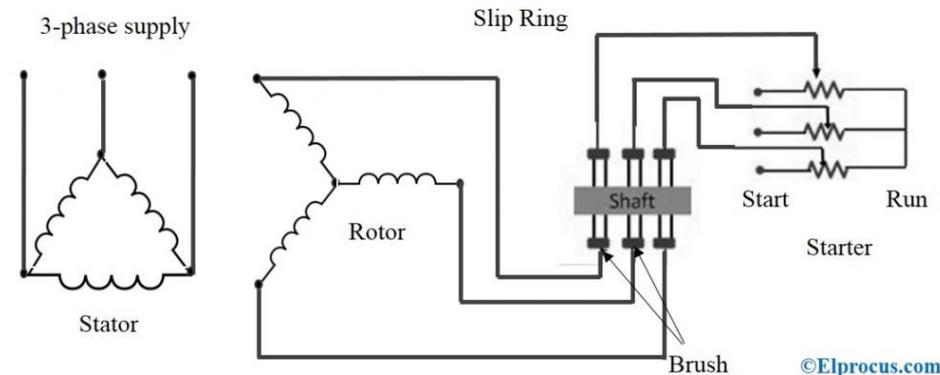
Le **rotor bobiné (ou à bagues)** est rencontré dans des applications de forte puissance.

Il comprend un bobinage triphasé, dont l'alimentation est apporté par un système de bagues-balais.



Les enroulements rotoriques sont reliés à des résistances externes via les bagues et des balais. Elles permettent de régler le déphasage entre la force électro-motrice induite et les courants induits dans les enroulements.

Objectif : réduire la phase entre courant et tension de sorte à aligner le courant induit le plus fort avec le flux magnétique du stator. Ainsi la force de Laplace est à son plus fort, et le couple est maximal.



Rotor à cage ou à cage d'écureuil

- + Rotor très simple : très faible coût
- + Pas de contact entre rotor et stator
- + Vitesse de rotation élevée
- Couple de démarrage faible
- + Démarrage autonome (sans pilotage particulier)
- + Rendement élevé (~ 96%)

Applications : machines à laver, ventilateurs, pompes, compresseurs, mélangeurs, véhicules électriques, ...

Rotor bobiné ou rotor à bagues

- Rotor complexe : coût élevé
- Contact des bagues → maintenance importante
- Vitesse de rotation faible (poids du rotor)
- + Couple de démarrage élevé
- Démarrage nécessite un pilotage
- Rendement plus faible
- + Pilotage simple sur une grande plage de vitesse
- + En forte puissance, l'électronique de puissance du rotor est peu coûteuse

Applications : fortes puissances en fonctionnement MADA (éolienne, ...)

Quelques vidéos

Sabin Civil Engineering : How does an Induction Motor work?
Anglais, MAS à cage, 6:45

https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o

Sabin Civil Engineering : Slip ring Induction Motor, How it works?
Anglais, MAS à bagues, 6:19

<https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>

The Engineering Mindset : Comment fonctionnent les moteurs électriques - Moteurs à induction triphasés
Français, MAS à cage, 15:33

https://www.youtube.com/watch?v=59HBoIXzX_c

Le principe de fonctionnement de la MAS se résumé en quatre étapes :

1. **Le stator génère un champ magnétique tournant**, de pulsation Ω_s proportionnelle à celle des courants statoriques ω_s (au nombre de paires de pôles p près).

$$\Omega_s = \omega_s / p$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ statorique [rad/s]

ω_s : pulsation des courants statoriques [rad/s]

p : nombre de paires de pôles

2. **Les conducteurs rotoriques subissent une force électro-motrice** induite par les variations d'induction magnétique.

$$e(t) = - \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

$e(t)$: force électro-motrice (f.é.m.) induite [V]

$\Phi(t)$: flux magnétique [Wb]

3. Les f.e.m. induites au sein des conducteurs induisent des **courants rotoriques**.

4. Les courants rotoriques sont brassés par le champ magnétique tournant et provoquent des **forces de Laplace**, et donc le déplacement de ces conducteurs et donc la rotation du rotor, dans le même sens que le champ tournant statorique.

$$\vec{F} = \vec{I} \cdot l \wedge \vec{B}$$

F : force de Laplace [N]

I : intensité du courant [A]

l : longueur du conducteur traversé par le courant [m]

B : induction magnétique [T]

Principe de fonctionnement

Les forces de Laplace dans le rotor ne peuvent perdurer uniquement tant que :

- Tant qu'il y a des courants induits dans le rotor, donc :
- Tant qu'il y a une f.e.m. induite aux bornes des conducteurs rotoriques, donc :
- Tant que les conducteurs rotoriques subissent une variation d'induction magnétique, donc :
- **Tant que le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ statorique !**

Le rotor et le champ magnétique statorique ne tournent pas à la même vitesse,

D'où la relation :

$$\Omega_s \neq \Omega$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ magnétique statorique [rad/s]

Ω : vitesse de rotation de l'arbre du rotor [rad/s]

Et d'où le nom :

Machine Asynchrone

Le principal paramètre des machines asynchrones est le glissement g :

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

Ω_s : vitesse de rotation du champ magnétique statorique [rad/s] ($\Omega_s = \omega_s / p$)

Ω : vitesse de rotation de l'arbre du rotor [rad/s]

g : glissement

Sa valeur indique le fonctionnement de la MAS :

- $g = 1 \rightarrow \Omega = 0 \rightarrow$ Stator alimenté, rotor à l'arrêt
- $g = 0 \rightarrow \Omega = \Omega_s \rightarrow$ Impossible sans aide mécanique
- $g < 1 \rightarrow \Omega < \Omega_s \rightarrow$ (mode hyposynchrone) MAS en mode moteur
- $g < 0 \rightarrow \Omega > \Omega_s \rightarrow$ (mode hypersynchrone) MAS en mode générateur
- $g > 1 \rightarrow \Omega < 0 \rightarrow$ MAS en freinage

En fonctionnement nominal, le glissement $|g| < 10 \%$.

Glissement

Les courants rotoriques sont de pulsation ω_r relativement faible :

$$\Omega_r = \omega_r / p = \Omega_s - \Omega$$

En résumé, le champ magnétique statorique, le champ magnétique rotorique et l'arbre du rotor tournent tous les trois à une vitesse différente :

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

$$\Omega_s = \omega_s / p$$

$$\Omega_r = \omega_r / p$$

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

Ω_s : vitesse de rotation du champ magnétique statorique [rad/s]

Ω_r : vitesse de rotation du champ magnétique rotorique [rad/s]

Ω : vitesse de rotation de l'arbre du rotor [rad/s]

N : vitesse de rotation de l'arbre du rotor [tour/min]

ω_s : pulsation des courants statoriques [rad/s]

ω_r : pulsation des courants rotoriques [rad/s]

p : nombre de paires de pôles

Considérons une MAS à rotor bobiné :

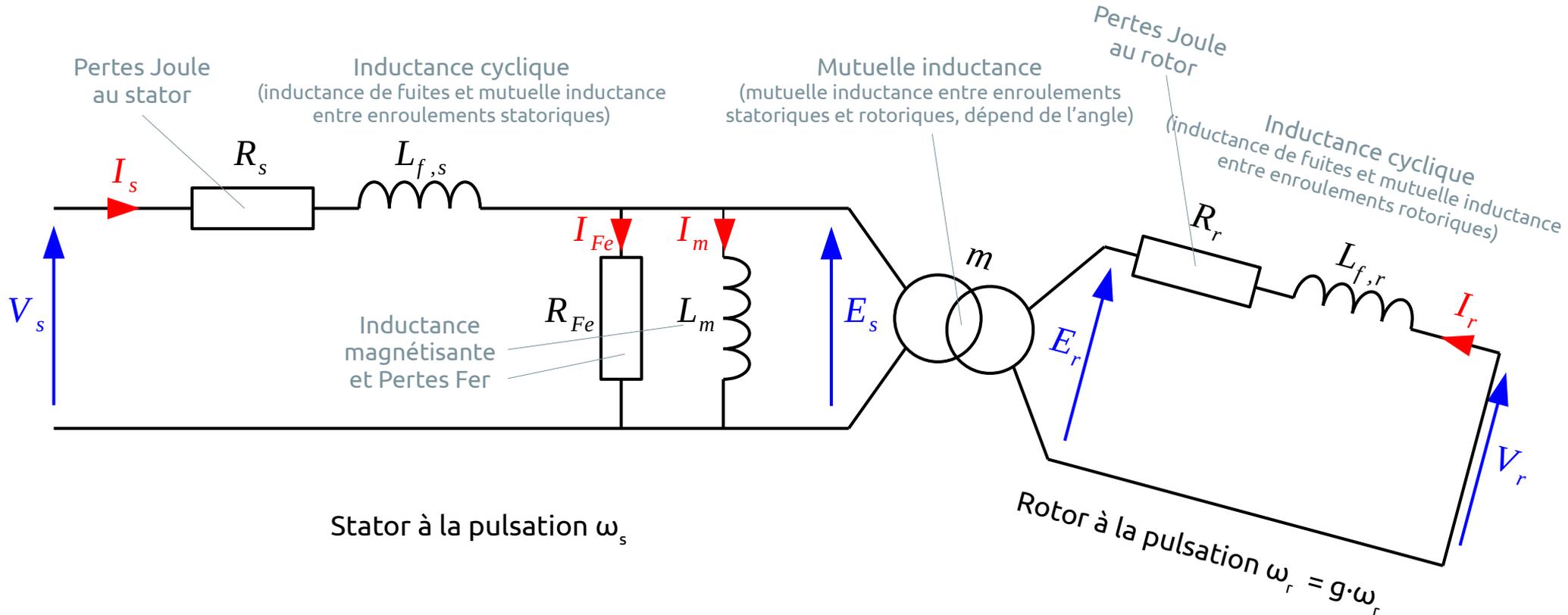
- 3 enroulements au stator
- 1 circuit magnétique (au stator + entrefer + au rotor)
- 3 enroulements au rotor

La MAS est équivalente à un transformateur électrique triphasé !

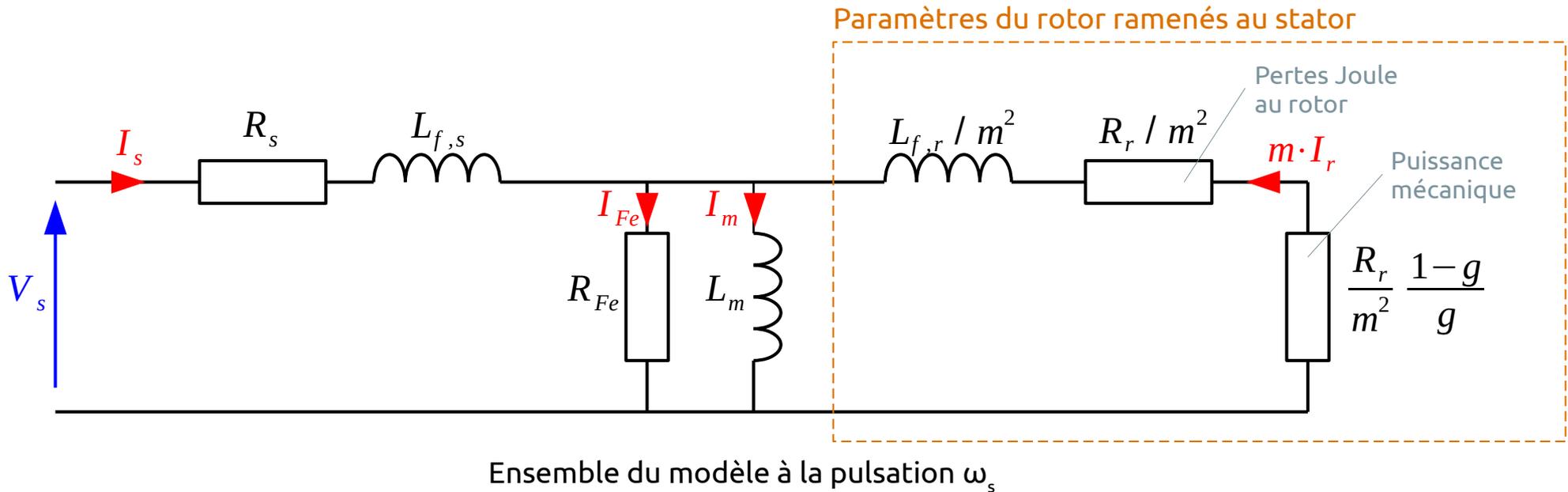
Sauf que :

- Le « secondaire » est tournant (pertes mécaniques en plus)
- Le « secondaire » est à une fréquence différente du « primaire »
- Le « secondaire » est en court-circuit
- L'énergie de magnétisation est plus importante (due à l'entrefer)

Schéma équivalent d'une phase en régime permanent



Comme pour le transformateur, on ramène tous les paramètres au primaire.



Plusieurs autres modèles existent, certains étant plus adaptés à certaines lois de commandes.

Modélisation

Donnons l'expression de la puissance électromécanique P_{em} .

En négligeant les pertes Joule statoriques (hypothèse valide en haute puissance), les pertes Fer (valide avec un bon circuit magnétique feuilleté) et les fuites magnétiques au stator.

$$P_{em} = 3 \times R_r \cdot \frac{1-g}{g} \times I_r^2 = C_{em} \cdot \Omega \quad \text{avec} \quad I_r^2 = \frac{V_s^2}{\left(\frac{L_{f,r}}{m^2} \cdot \omega_s\right)^2 + \left(\frac{R_r}{m^2 \cdot g}\right)^2}$$

Ce qui donne l'expression du couple électromécanique C_{em} en fonction du glissement g :

$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g^*}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g^*}\right)^2} \quad \text{avec} \quad g^* = \frac{R_r}{L_{f,r} \cdot \omega_s} \quad \text{et} \quad C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L_{f,r}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2$$

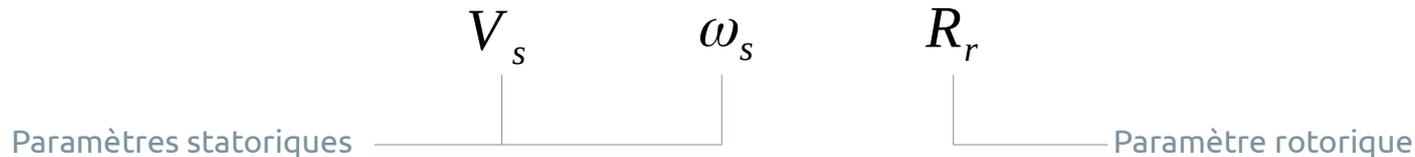
Modélisation

Ce qui donne l'expression du couple électromécanique C_{em} en fonction du glissement g :

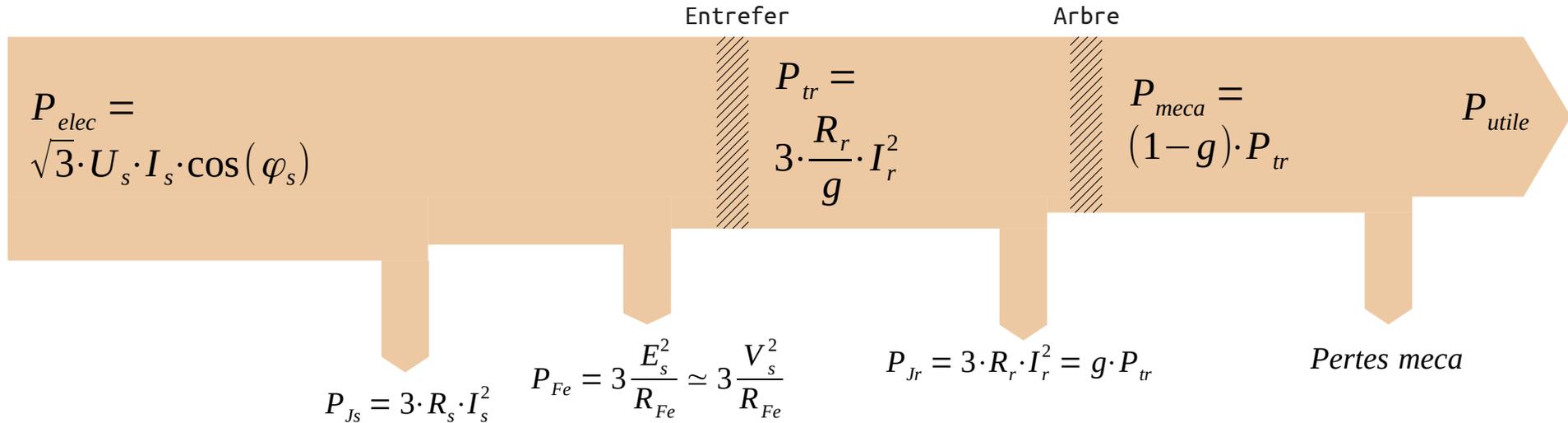
$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g^*}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g^*}\right)^2} \quad \text{avec} \quad g^* = \frac{R_r}{L_{f,r} \cdot \omega_s} \quad \text{et} \quad C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L_{f,r}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2$$

$$\text{sans oublier} \quad \Omega = (1-g) \cdot \frac{\omega_s}{p}$$

Ainsi les lois de commande scalaire peuvent effectuer une variation de puissance en jouant sur trois paramètres accessibles :



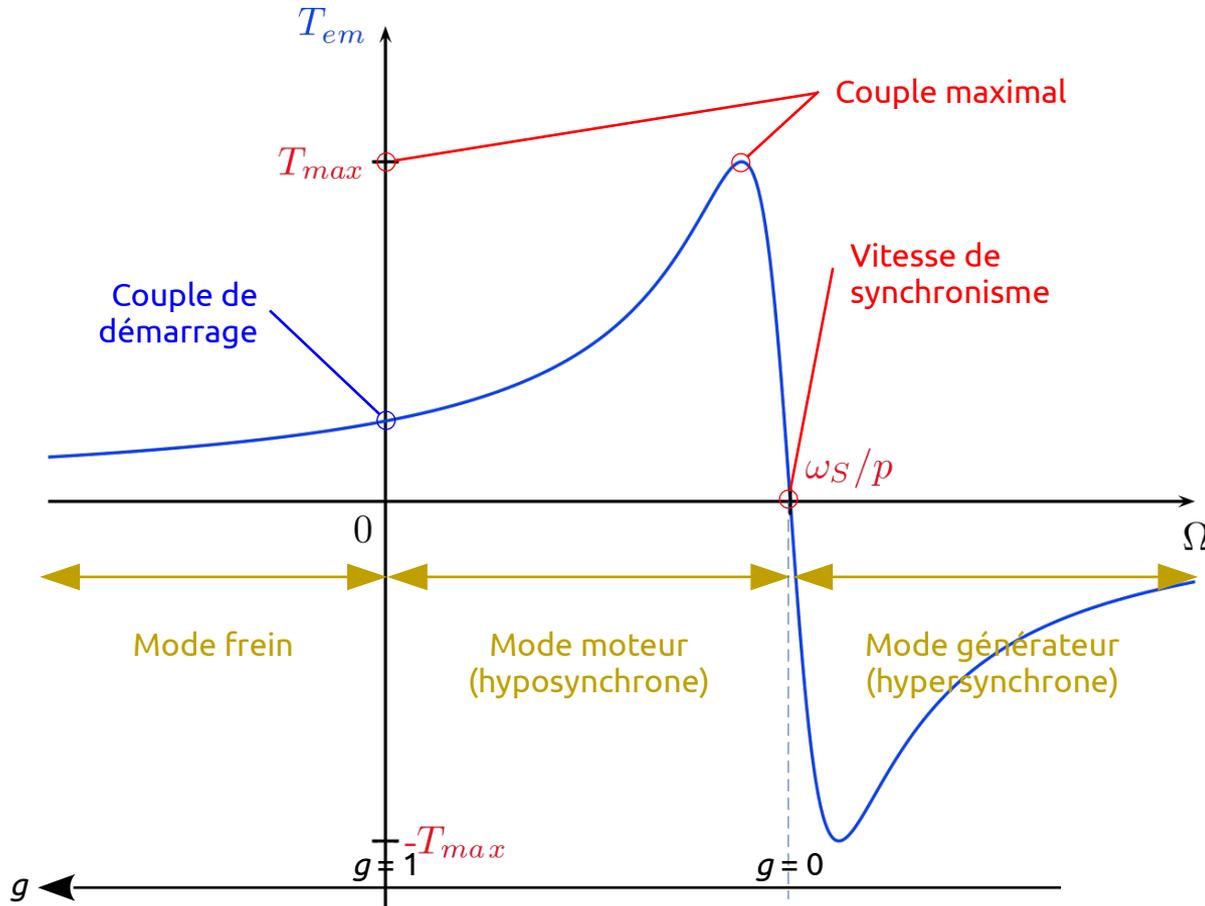
Bilan de puissance



$$\eta = \frac{P_u}{P_{elec}} \simeq \frac{P_{tr}}{P_{elec}} \times \frac{P_{meca}}{P_{tr}} = \eta_s \times \eta_r$$

$$\eta \simeq \frac{P_{meca}}{P_{elec}} = \frac{P_{tr}}{P_{elec}} \cdot (1 - g) \rightarrow \eta \leq (1 - g)$$

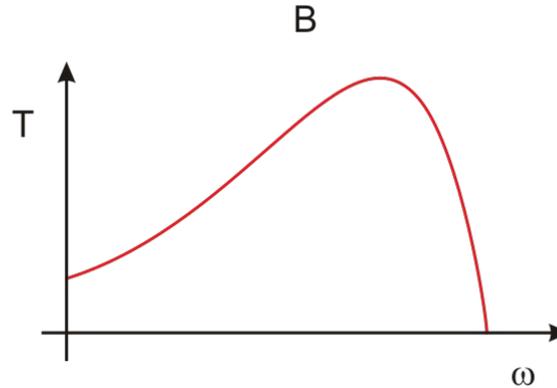
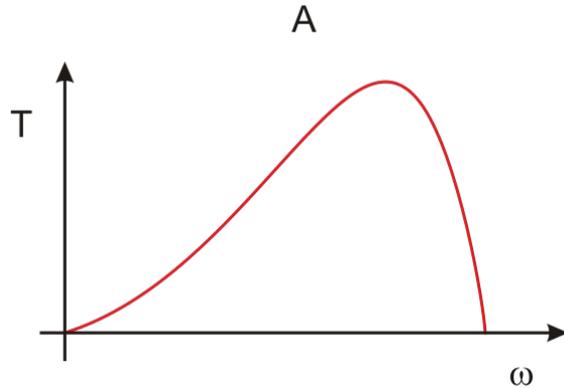
Caractéristique vitesse-couple



L'enveloppe bleue représente le couple électromagnétique C_{em} maximal pour une vitesse de rotation Ω donnée.

Caractéristique vitesse-couple

La constitution de rotor va influencer sur la caractéristique vitesse-couple du rotor.

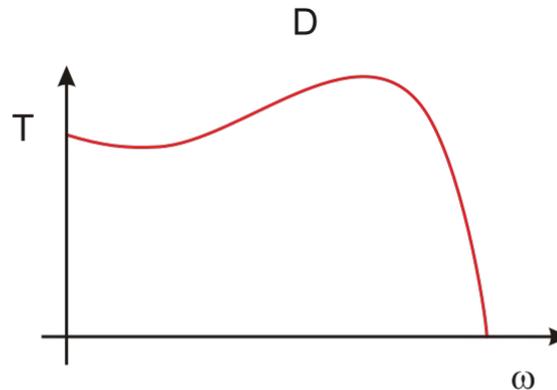
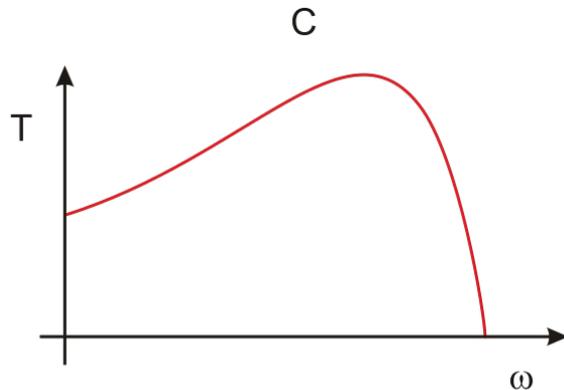


A. Moteur monophasé

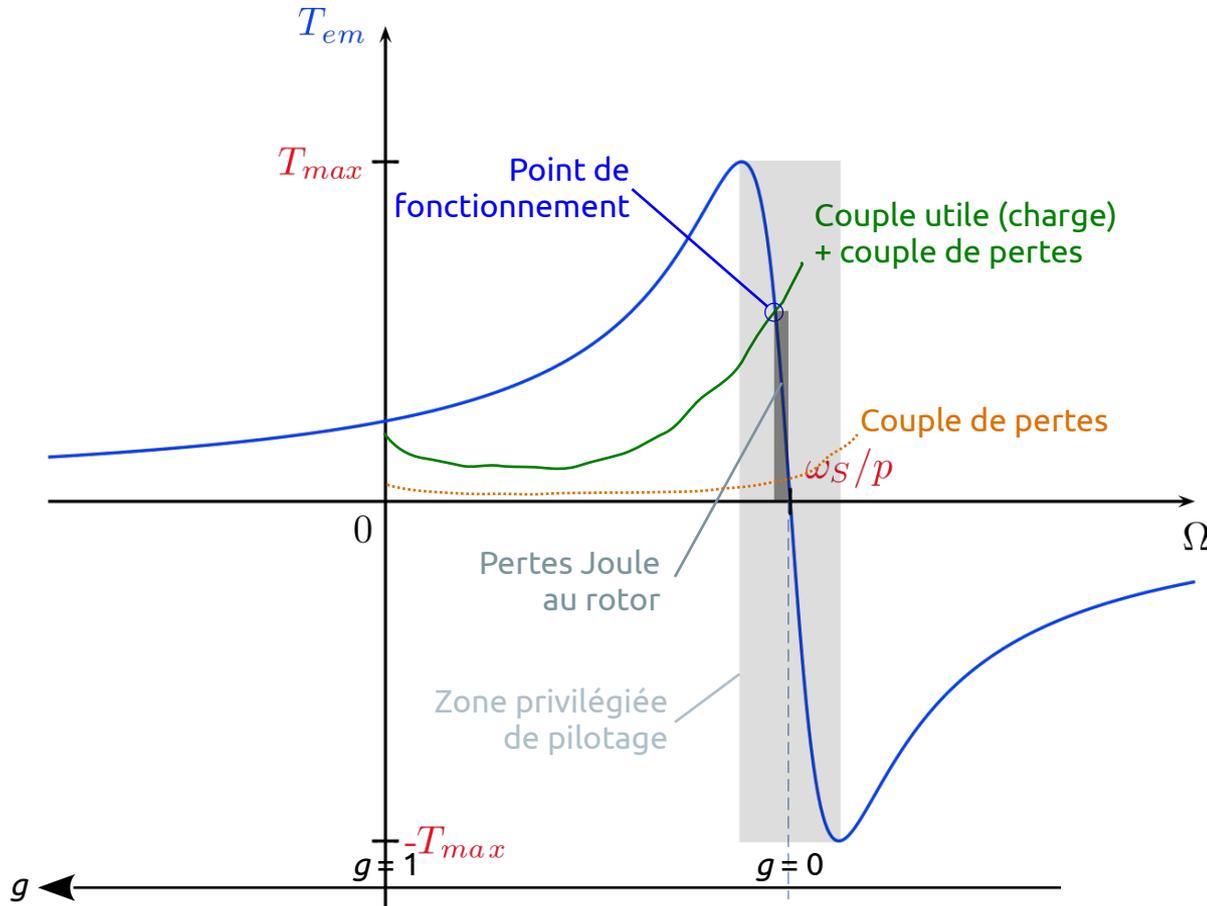
B. MAS triphasée, rotor à cage

C. MAS triphasée, rotor à cage, encoches profondes

D. MAS triphasée, rotor à cage, double cage



Caractéristique vitesse-couple

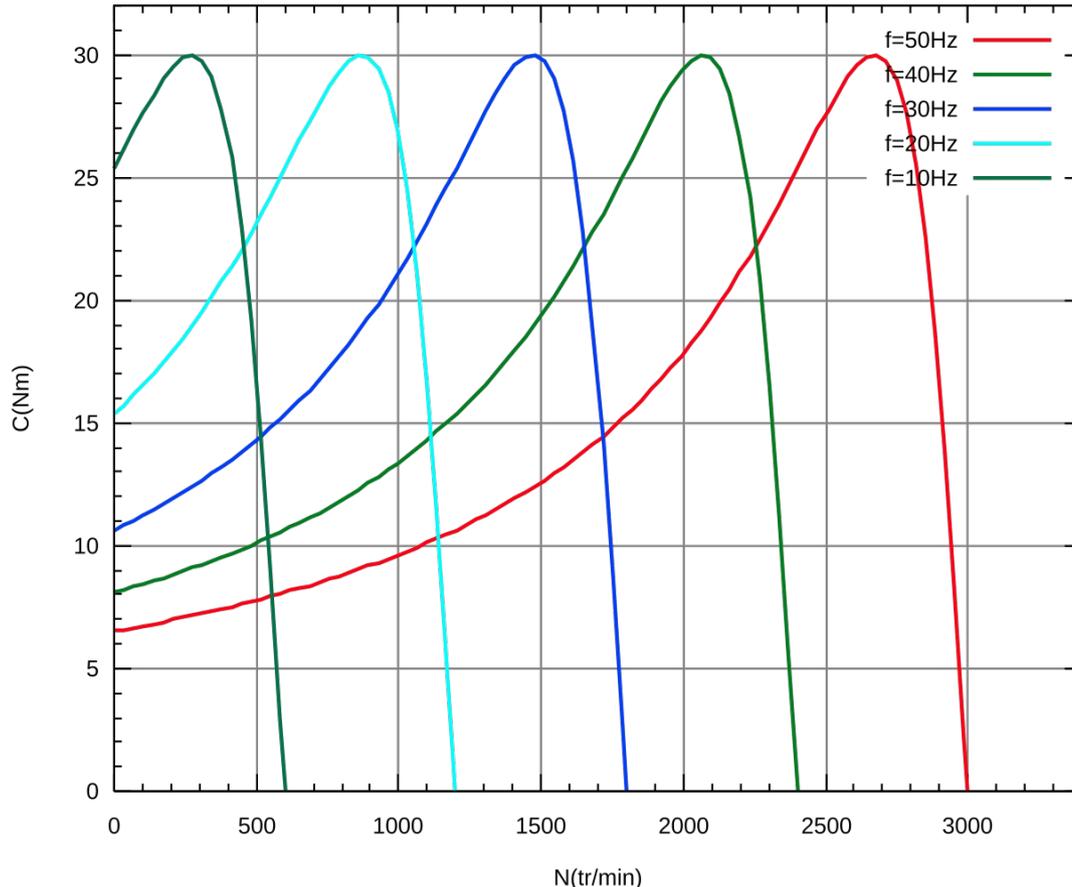


Le couple au démarrage imposé par la charge doit toujours être plus faible que celui pouvant être délivré par la machine.

En régime permanent, on imposera le point de fonctionnement entre $[g^* ; C_{max}]$ et $[-g^* ; -C_{max}]$:

- Risque d'instabilité en dehors de cette zone (selon le couple rés.)
- Pente plus raide (variation de couple = peu de variation de vitesse de rotation)
- les pertes Joule rotoriques correspondent à la surface du rectangle délimité par le point de fonctionnement et le point de synchronisme.

Méthodes de commande : commande scalaire en V/f



Commande scalaire en V/f

Pour disposer du couple électromagnétique maximal C_{max} sur une grande plage de vitesse de rotation,

ou pour disposer d'une vitesse de rotation variable pour un couple C donné,

on utilise une commande scalaire dite **commande en V/f constant**.

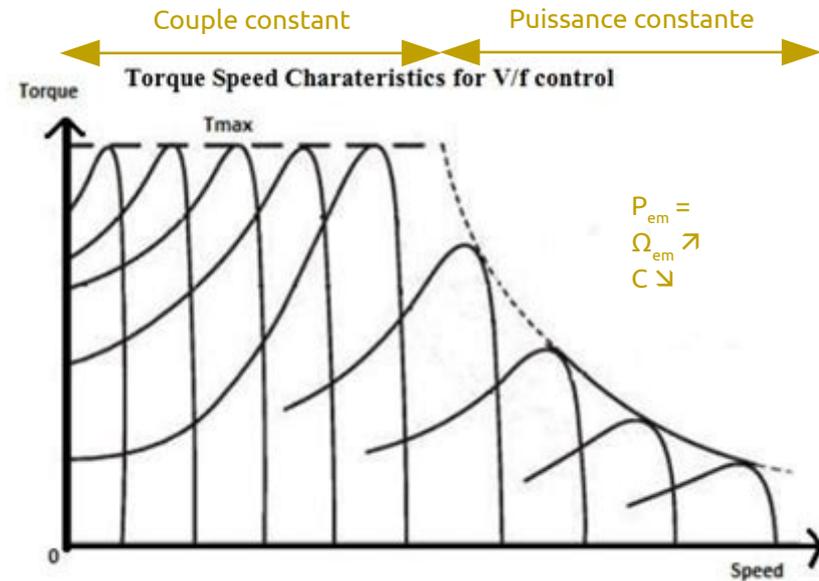
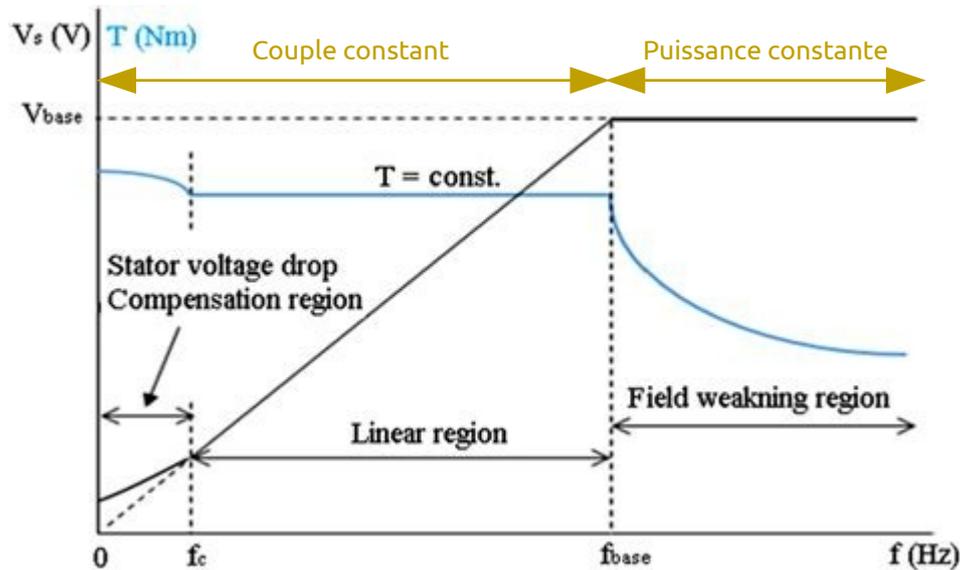
$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L_{rs}} \times \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2$$

Cette solution nécessite l'utilisation d'un variateur de vitesse.

Toutefois la commande en V/f a ses limites :

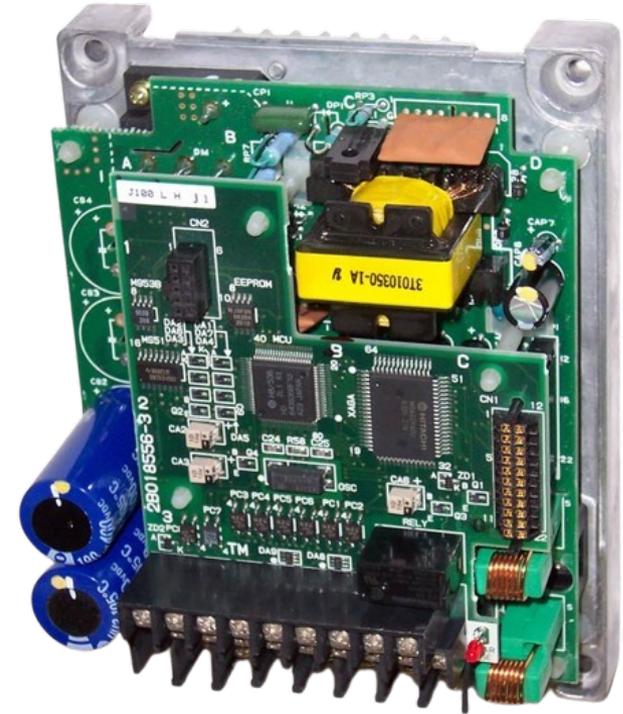
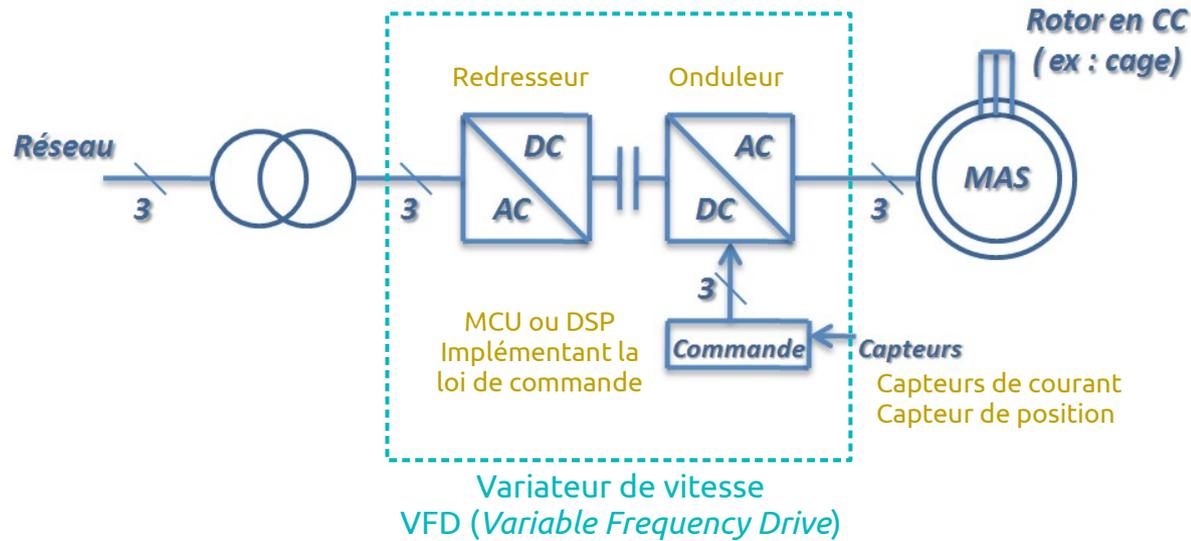
À faible $f \rightarrow$ zone de couple constant

À forte f , et donc à forte V , on ne peut aller au-delà de la tension nominale \rightarrow zone de puissance constante

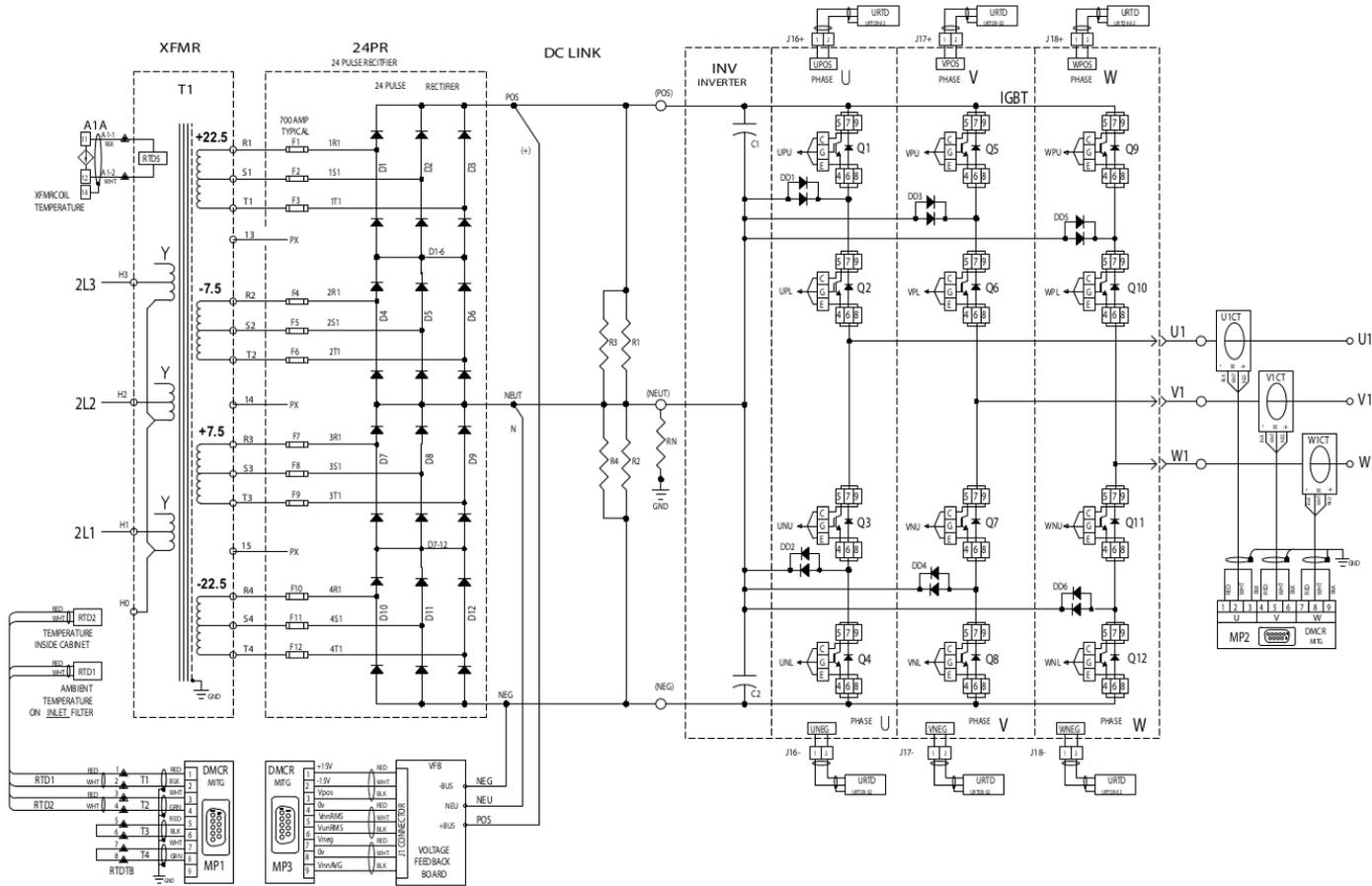


Méthodes de commande : commande scalaire en V/f

Constitution d'un variateur de vitesse



Variateur faible puissance



Eaton SC9000 EP
Medium-voltage VFD
2400-13800 V ; 1-120 Hz
9 MW ; $\eta > 97\%$
Diodes, IGBTs, DSP

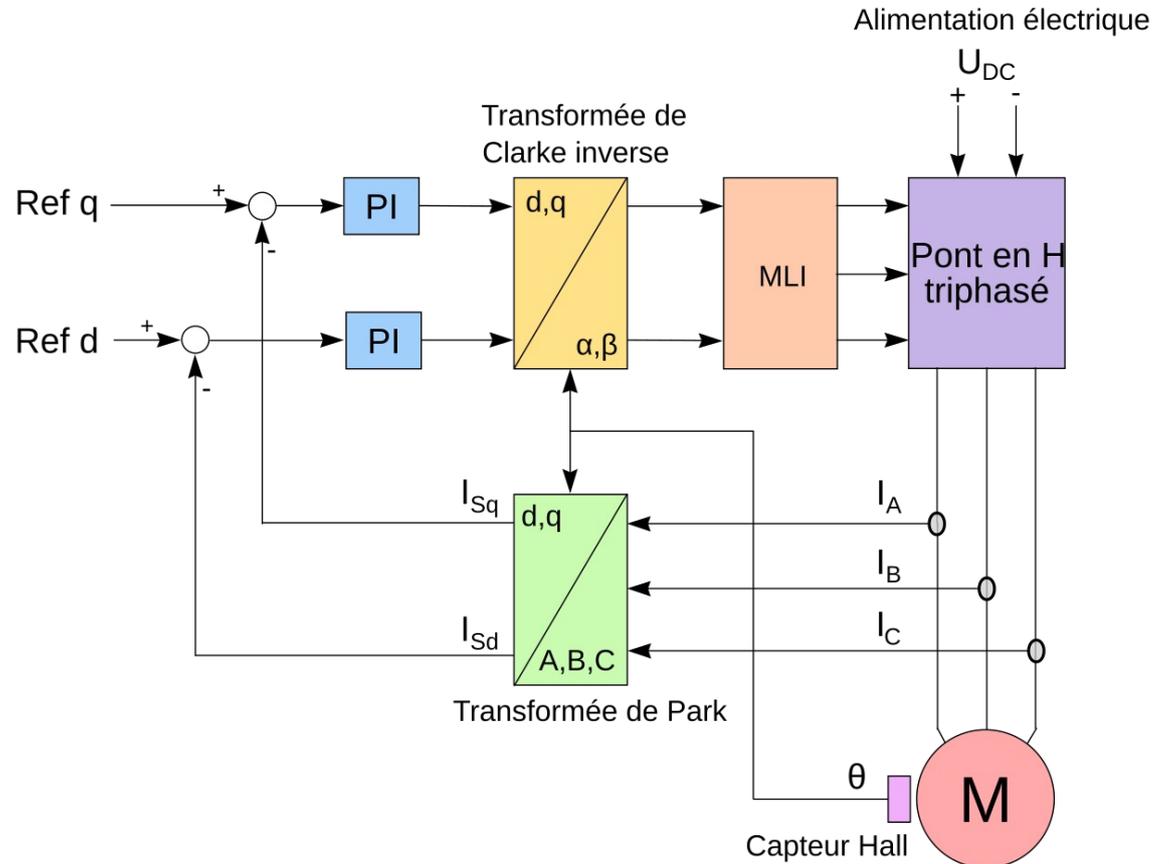
Méthodes de commande : commande vectorielle

Pour faciliter le pilotage d'une MAS, on utilise une commande vectorielle (ou commande à flux orienté).

Elle permet de commander la MAS en couple et en flux magnétique, à l'aide de deux vecteurs orthogonaux. Il n'y a plus que deux grandeurs à manipuler (au lieu de trois), et elles sont indépendantes.

On utilise pour cela des outils mathématiques (transformée de Park, de Clarke) et généralement des capteurs de position du rotor (ex : capteur effet Hall).

L'alimentation de la MAS peut se faire avec un pont en H, usuellement piloté par PWM.



Méthodes de commande : commande vectorielle

Commande scalaire

(commande V/f, la plus utilisée)

- + Relativement simple
- + Relativement peu cher

Commande vectorielle

(commande à flux orienté, la plus utilisée)

- Calculs complexes et coûteux (processeur spécialisé)
- Électronique coûteuse (capteurs)

- + Précise et rapide
- mais peu robuste face aux variations des paramètres

- + Contrôle du couple à l'arrêt

Avec l'augmentation de la puissance de calcul des processeurs et la diminution des coûts associés, la commande vectorielle va à terme remplacer la commande scalaire.

Les Machines Asynchrones (MAS) sont principalement utilisées en **mode moteur**, notamment dans les applications de **très fortes puissance**.

Jadis utilisées pour la production d'électricité, elles disparaissent au profit de la machine synchrone.



Machine Asynchrone à rotor bobiné

1345 kW
6600 V
297 rpm, 43245 N·m
21.9 tonnes au total (dont 10.4 au rotor)

Pour une aciérie en Argentine

← Système bagues-balais

Stator à 20 pôles →

<https://www.menzel-motors.com/reference/custom-replacement-motor-for-steel-mill/>

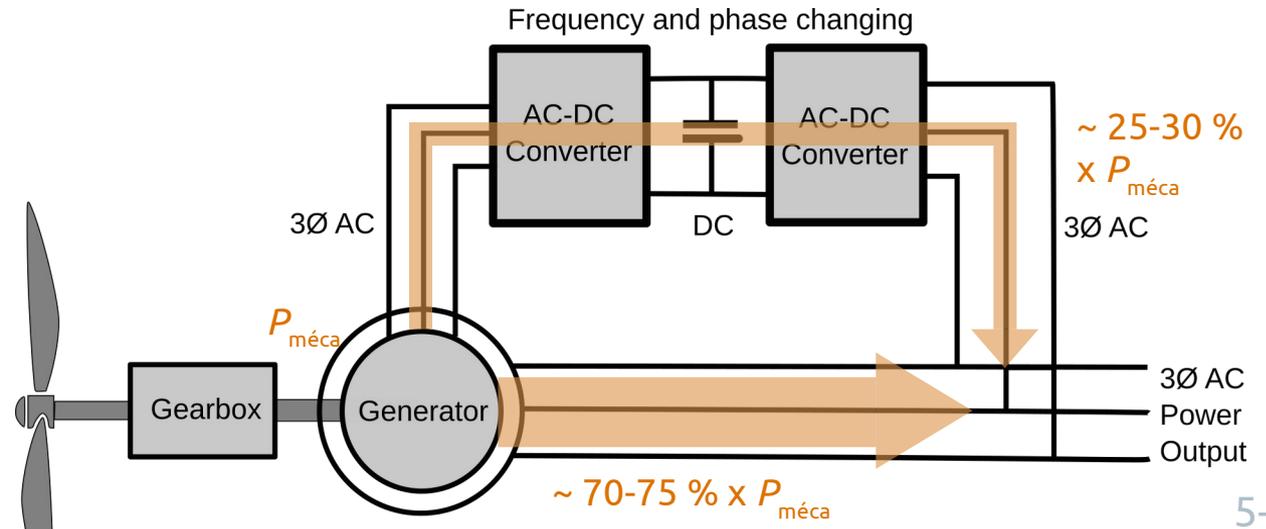


MAS : Machine Asynchrone à Double Alimentation

En fonctionnement générateur, la MAS est principalement utilisée dans les éoliennes en forte puissance en **cascade hyposynchrone** ou **MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation)**.

L'idée est désormais de piloter la MAS non par son stator, mais par son rotor. En pilotant le rotor (commande vectorielle), il est possible d'ajuster la puissance active et réactive de la MAS sans en changer sa vitesse de rotation. Une faible partie de la puissance mécanique étant envoyée au réseau par le rotor (le reste par le stator), donc le coût (complexité, taille) de l'électronique de puissance en est réduit

- + Rendement élevé
- + Vitesse variable
- + Éln.Pu. de faible coût
- MAS à rotor bobiné (maintenance)
- Plage de vitesse réduite



 ASEA BROWN BOVERI		ASYNCHRONMASCHINE MACHINE ASYNCHRONE ASYNCHRONOUS MACHINE									
		No. AW	818 174	1988	Typ	QW Gy 800 xa 4					
AC 401 545	P	5000	kW	Duty	S1	cos ψ	0,89	m	15 800	kg	
	n	1480	1/min			f	50	Hz	IC W 37 A 81		
	U ₁	10000	V	I ₁	335	A 3~ Y		IM	B3		
	U ₂		V	I ₂		A 3~		IP	54		
	Mec.					EI.	VDE-0530	CI.	F		
	Micadur [®] Compact										

Puissance 5 MW

$$f = 50 \text{ Hz} = f_s$$

$$\rightarrow \omega_s = 100 \cdot n \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow \Omega_s = 50 \text{ tr/s}$$

$$\rightarrow N_s = 3000 \text{ tr/min}$$

$$n = 1480 \text{ tr/min} = \Omega$$

$$\rightarrow \Omega \approx \Omega_s / 2$$

$$\rightarrow p = 2 \text{ paires de pôle}$$

Couplage étoile au stator

Pas d'information pour le rotor

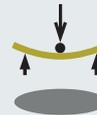
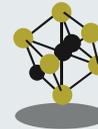
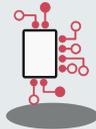
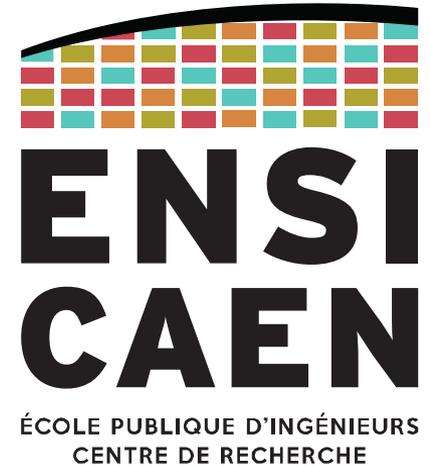
→ MAS à cage

MACHINE SYNCHRONNE (MS)

Permanent Magnet Motor

Synchronous Motor

Brushless DC Motor

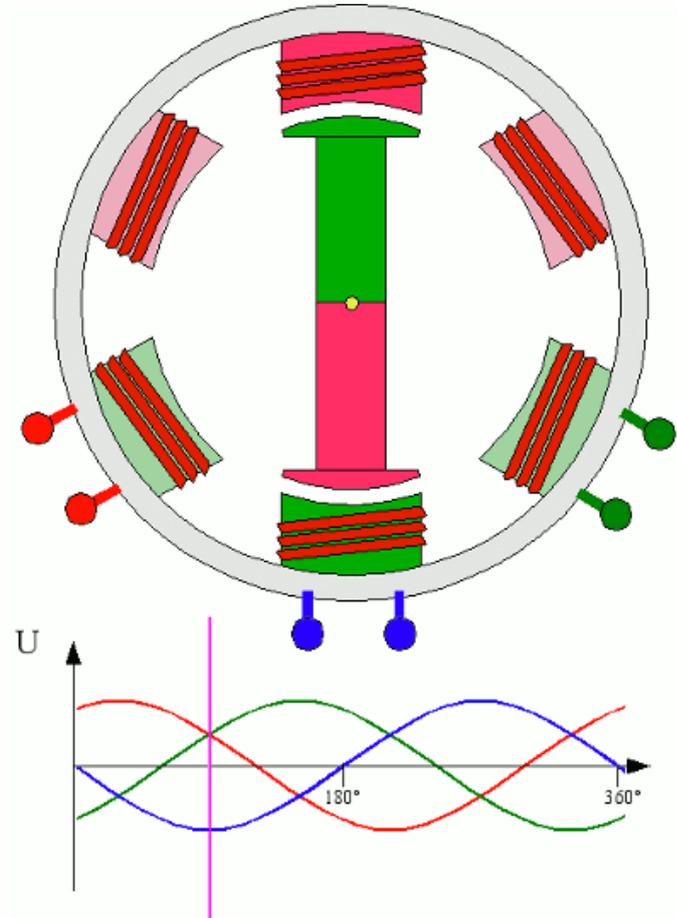


Le rotor de la Machine Synchrone joue le rôle d'inducteur en imposant une induction magnétique constante (donc $\omega_r = 0$).

Le stator est alimenté en courants triphasés de pulsation ω_s . Selon le nombre p de paires de pôles, le stator impose une force magnétomotrice tournante à la pulsation ω_s / p .

Ainsi le rotor cherchera à aligner son induction magnétique sur la f.m.m. et tournera donc à une vitesse $\Omega = \omega_s / p$.

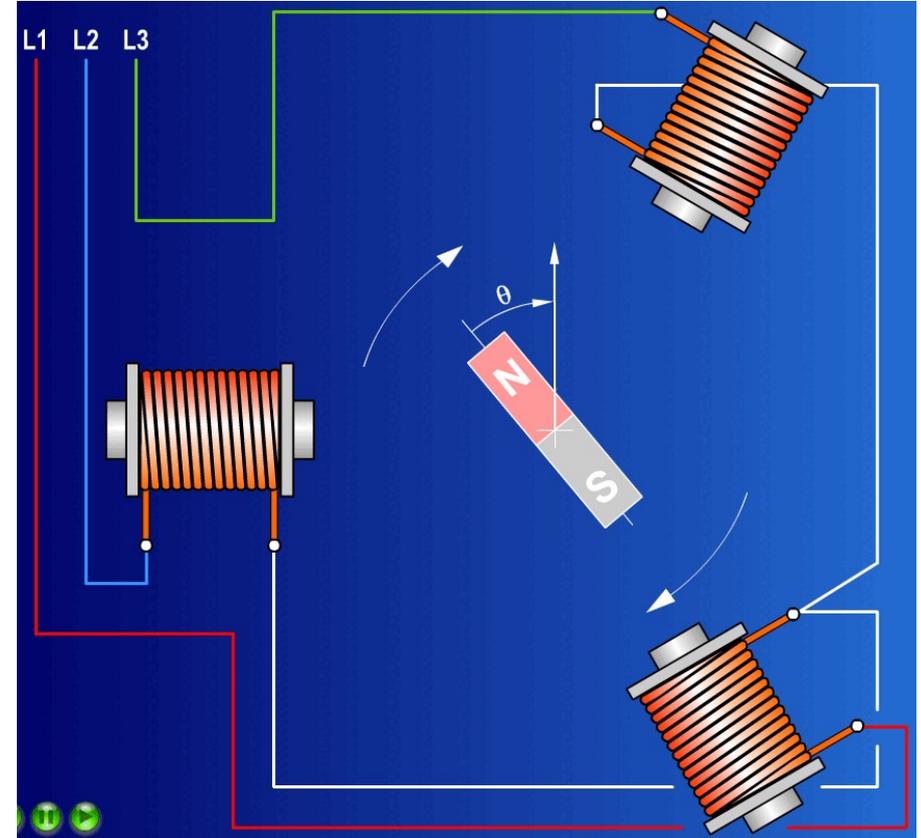
D'où le nom de Machine synchrone.



Toutefois l'induction magnétique du rotor et la f.m.m. au stator tournent à la même vitesse sans pour autant s'aligner.

En effet, il existe un angle $p \cdot \theta_0$ entre ces deux vecteurs, ce qui garanti l'existence d'une force tangentielle au rotor et donc l'existence d'un couple électromécanique.

En d'autres termes, la machine asynchrone ne peut fonctionner que si $p \cdot \theta_0 \neq 0$, condition assurée par une mesure d'angle et une commande adaptée.



L'inducteur du rotor peut être réalisé de deux manières.

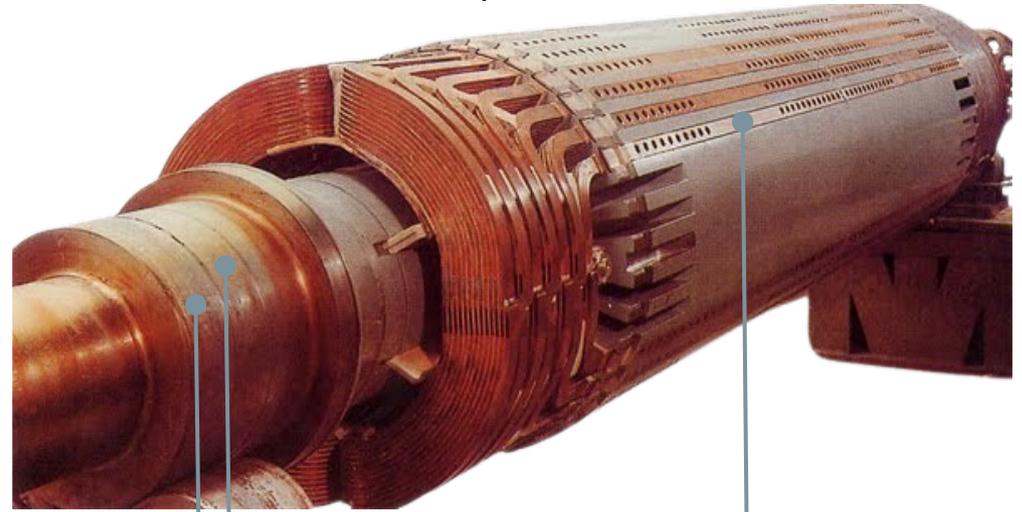
La première est par l'utilisation d'un **rotor bobiné**, alimenté en DC. L'alimentation se fait par deux bagues et deux balais. On distingue ici deux grands types de rotors bobinés.

Rotor à pôles saillants



Une saillance

Rotor à pôles lisses



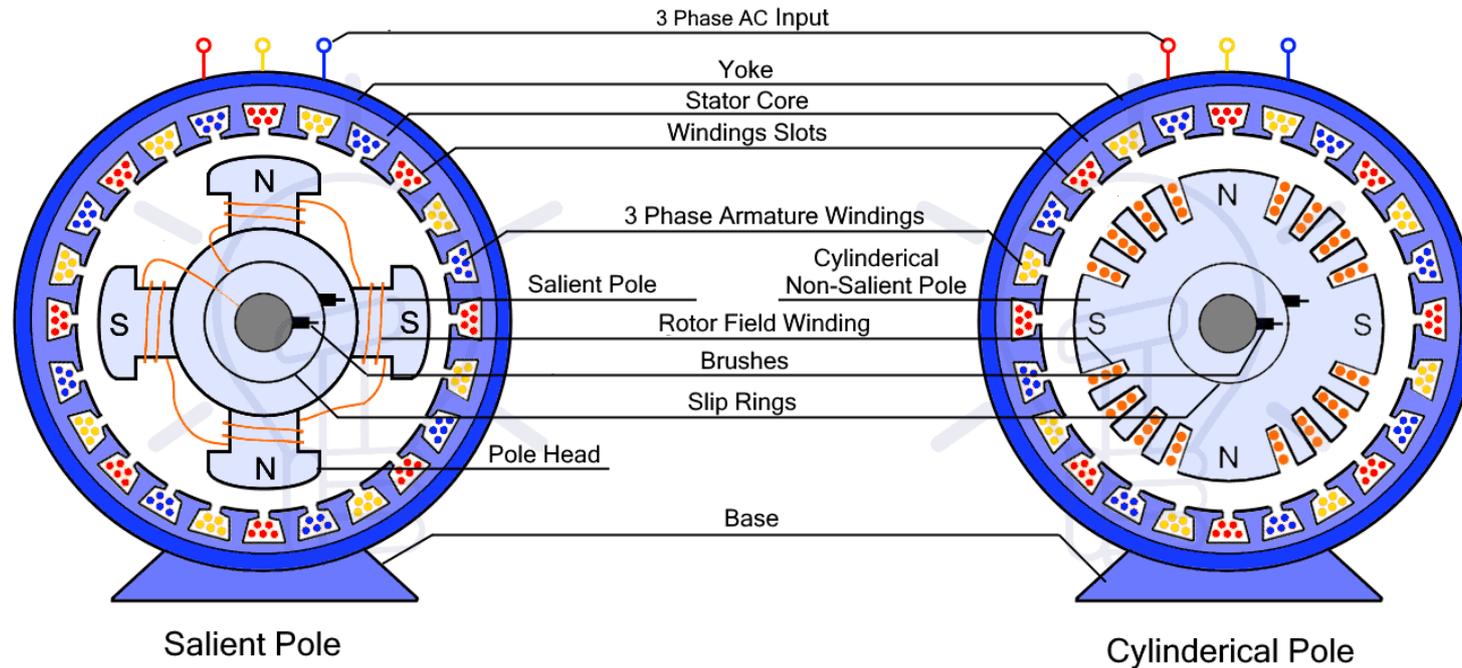
Bagues

Enroulement intégré au CM
→ pôle lisse

Rotor bobiné

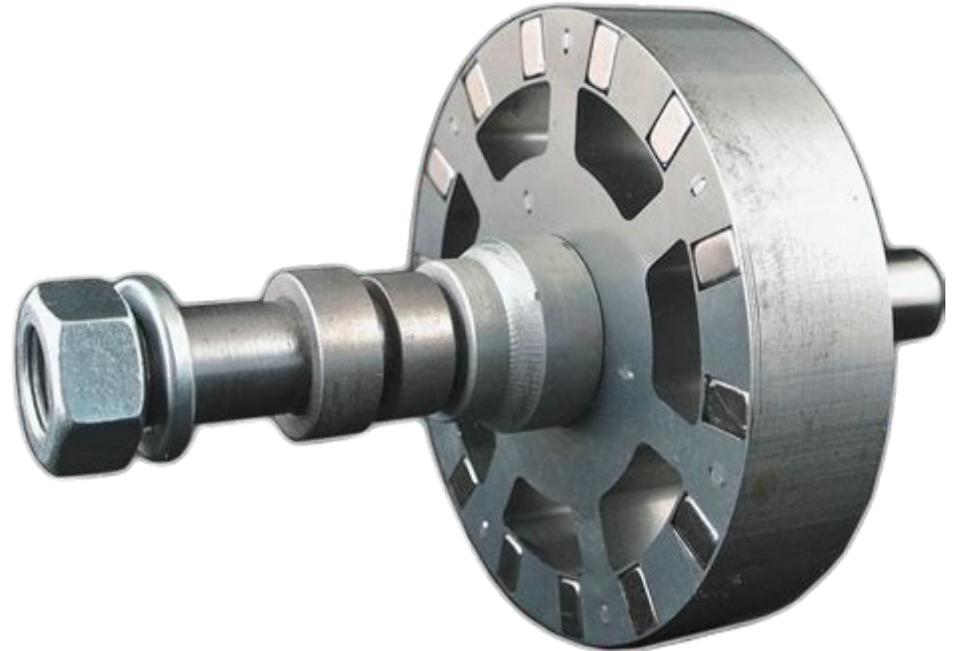
L'inducteur du rotor peut être réalisé de deux manières.

La première est par l'utilisation d'un **rotor bobiné**, alimenté en DC. L'alimentation se fait par deux bagues et deux balais. On distingue ici deux grands types de rotors bobinés.



L'inducteur du rotor peut être réalisé de deux manières.

La deuxième est par l'utilisation d'**aimants permanents**, en surface ou en profondeur du rotor.



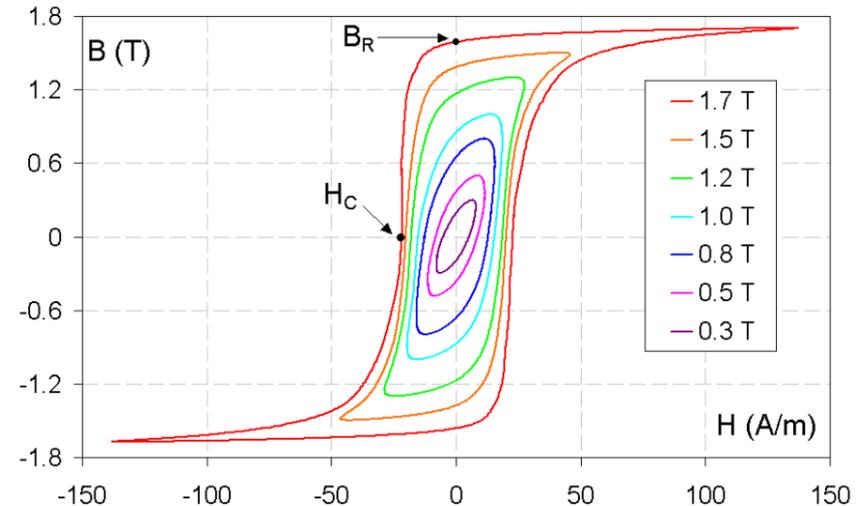
Rotor à aimants permanents

Les aimants utilisés sont des matériaux magnétiques durs.

- Ferrite
 - 0.2-0.4 T ; 100-300 kA/m Le plus économique
- Al-Ni-Co
 - 0.6-1.4 T ; 275 kA/m Peu sensible à la température, mais se désaimante facilement
- Samarium-Cobalt
 - 0.8-1.1 T ; 600-2000 kA/m Prix élevé (Cobalt)
- Néodyme-Fer-Bore
 - 1.0-1.4 T ; 750-2000 kA/m Prix en hausse (terres rares)

Rappels :

- B_R : champ rémanent en T
- H_C : Champ coercitif de désaimantation en A/m



Machine synchrone à rotor bobiné

- + Forte puissance
- + Pilotage plus fin (inducteur et induit)
- + Coût
- Encombrant
- Rendement plus faible
- Maintenance (bagues et balais)

Applications : industrie (pour la forte puissance), transport (idem), ...

- > à pôles lisses jusqu'à 6 pôles
- > à pôles saillants pour un grand nombre de pôles

Machine synchrone à aimants permanents

- + Rendement
- + Taille
- + Peu de maintenance
- Coût des aimants
- Sensible à la température
- Faibles à moyennes puissances uniquement

Applications : véhicules électriques (pour le rendement), électroménager (pour la faible conso), médical (pour la compacité), ...

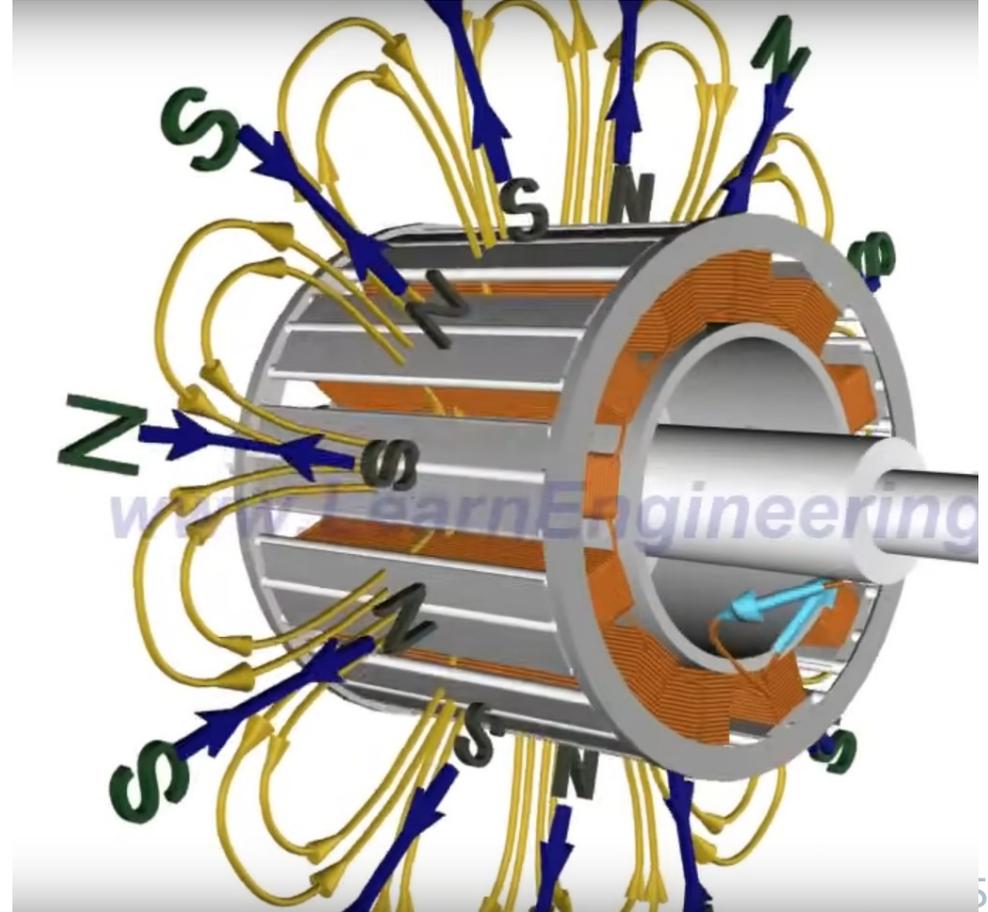
Vidéos explicatives

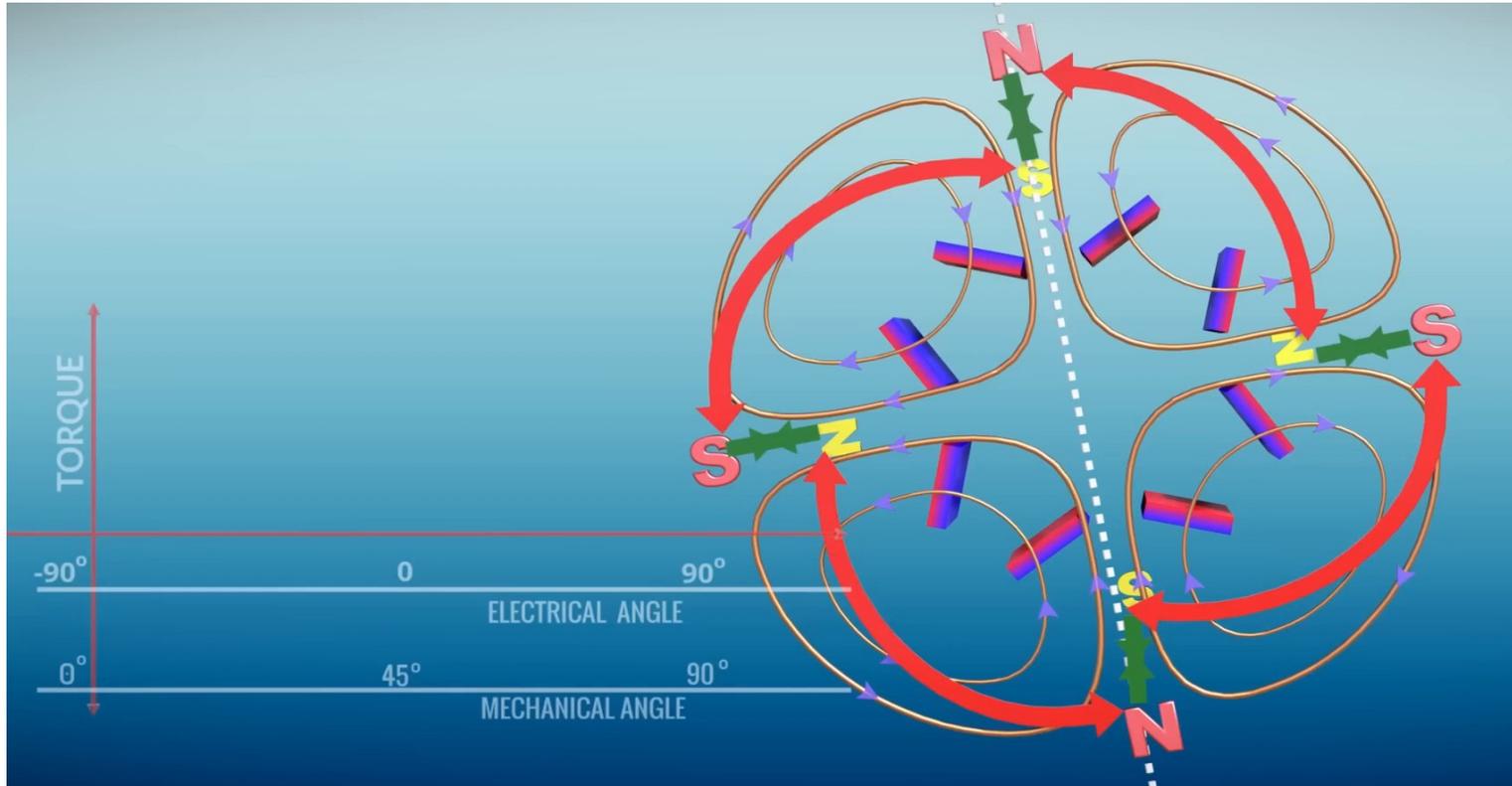
What is a SYNCHRONOUS MOTOR and how does it work? - Rotating magnetic field - Synchronism speed
JEAS Company (4:43)

<https://www.youtube.com/watch?v=Tk3lNBSAgEg>

Working of Synchronous Motor
Sabin Civil Engineering (4:13)

<https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZlhs>





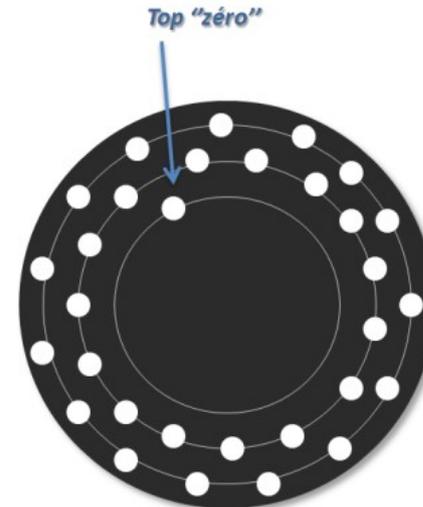
Principe de fonctionnement

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 une contrainte : la position angulaire du rotor doit être connue à chaque instant de la commande. Il est impossible de travailler avec un capteur de vitesse.



Codeur incrémental



Codeur incrémental

Contrairement à une MAS, la Machine Synchrone ne peut pas démarrer seule.

La vitesse de rotation du champ statorique est trop élevée pour le rotor à l'arrêt qui, de par son inertie, ne parvient pas à accrocher le champ statorique tournant.

En fonctionnement, la MS tourne forcément à la vitesse de synchronisme $\Omega = \omega_s / p$.

Donc la MS ne peut proposer de variation de vitesse si la pulsation des courants statoriques est fixe (ex 50 Hz). De même si le rotor de la MS est sujet à une variation importante de couple, alors le rotor va décrocher de la vitesse de synchronisme et s'arrêter.

Il est nécessaire de **démarrer et piloter la MS par électronique de puissance.**

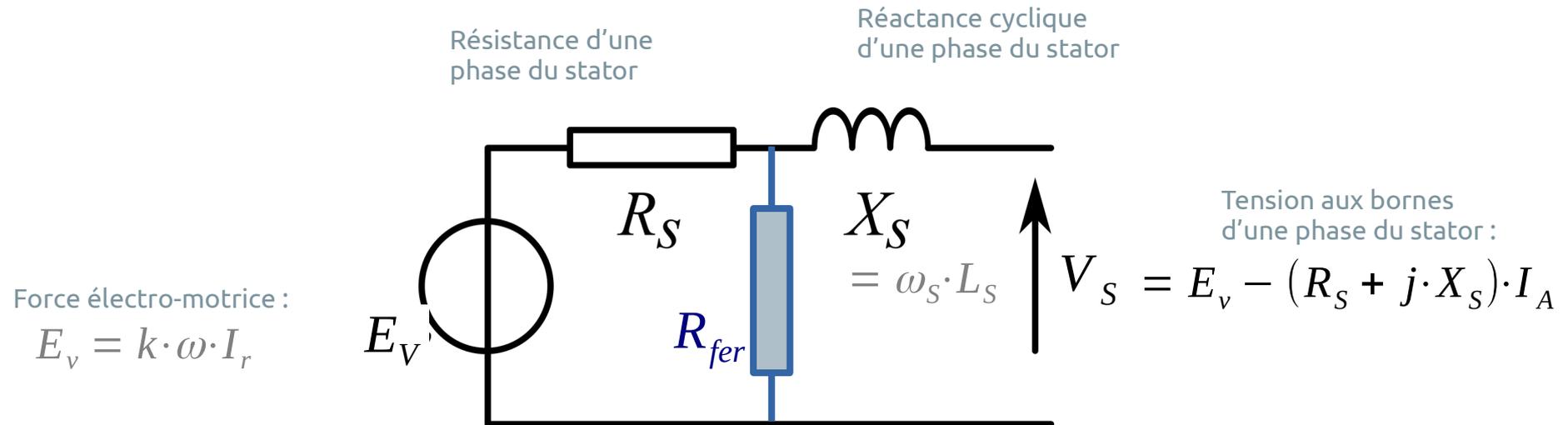
Note : certaines MS (auto-pilotées et à rotor bobiné) sont équipées d'une cage d'amortissement pour aider au démarrage.

Modélisation

Le modèle électrique le plus simple est le modèle de Behn-Eschenburg.

Il s'applique dans le cas d'une machine à pôles lisses, non saturée.

Pour une phase, le schéma équivalent est le suivant :



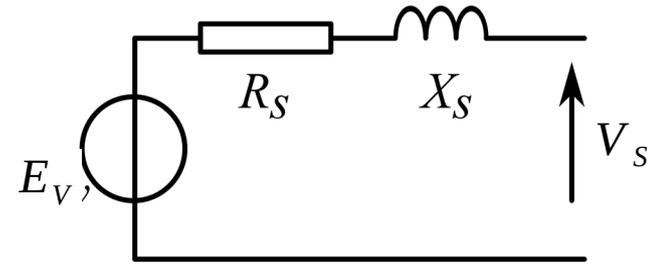
En général on peut considérer $R_s \ll X_s$, et négliger les pertes Fer.

À partir du précédent modèle, les puissances peuvent être exprimées :

$$P_{elec} = 3 \cdot V \cdot I_S \cdot \cos(\varphi)$$

$$P_{em} = 3 \cdot E_V \cdot I_S \cdot \cos(\psi)$$

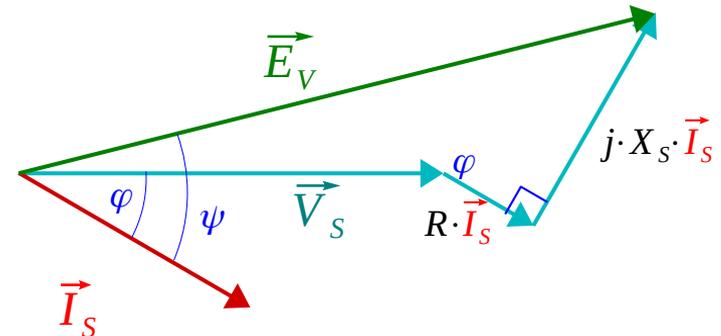
$$P_{meca} = \Omega \cdot C_{em} \simeq P_{em}$$



Donc le couple électromagnétique C_{em} vaut :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = 3 \cdot p \cdot \frac{E_V \cdot I_S}{\omega} \cdot \cos(\psi)$$

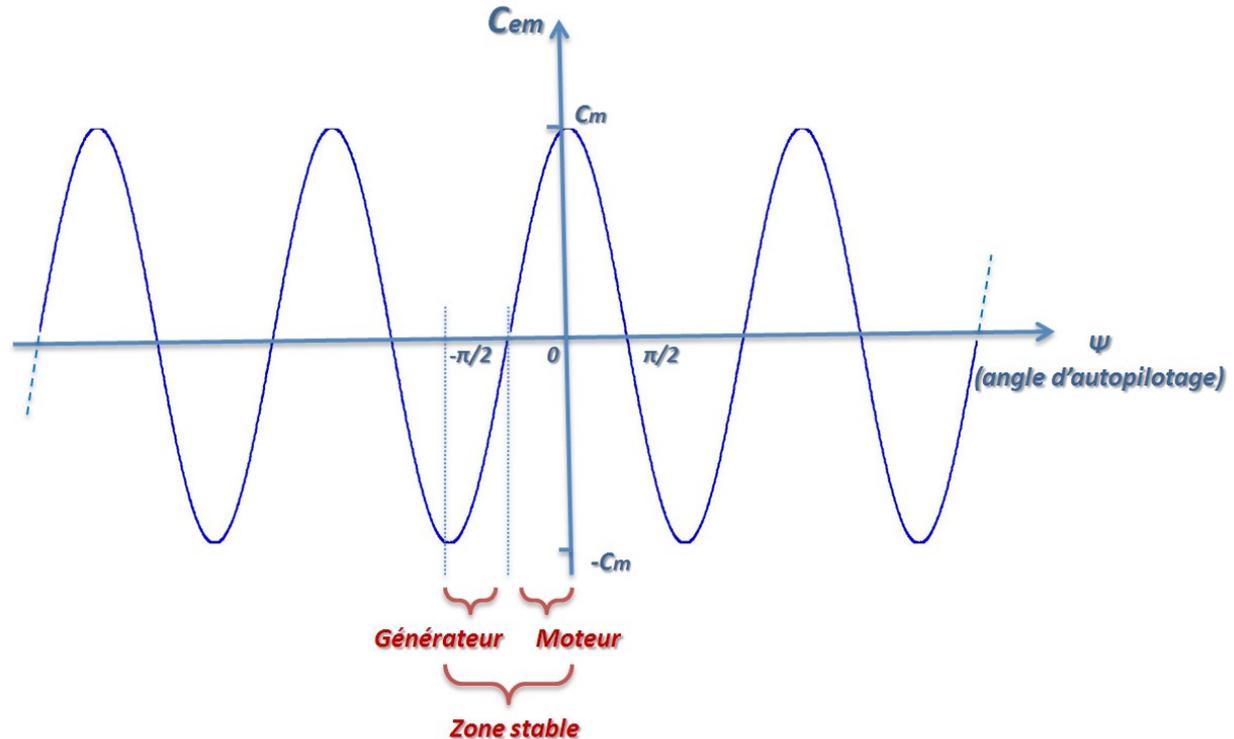
Où ψ est l'**angle d'autopilotage** de la machine, représentant le déphasage entre I_S et E_V .



Modélisation

Le couple est donc fonction de l'angle d'auto-pilotage ψ (à courant statorique I_s et à f.é.m. E_v fixés)

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \frac{E_v \cdot I_s}{\omega} \cdot \cos(\psi)$$

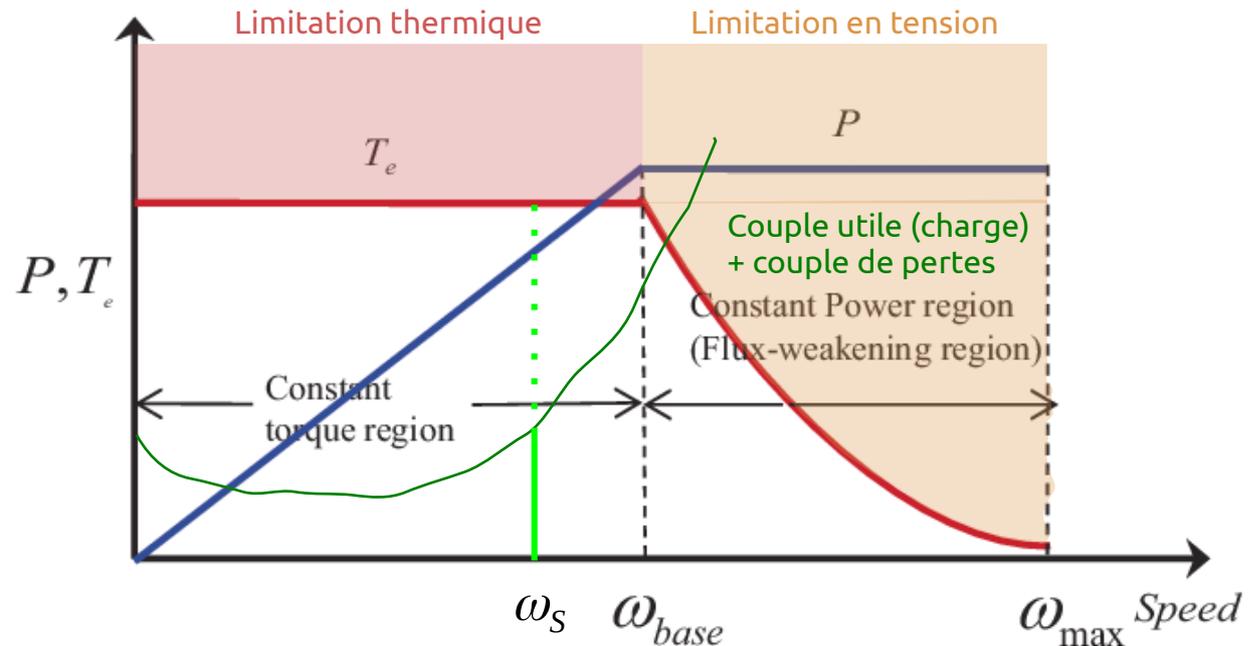


La caractéristique du couple en fonction de la vitesse.

Contrairement au cas de la MAS, les grandeurs *Couple* et *Vitesse* d'une machine synchrone sont indépendantes.

En travaillant avec une électronique de commande (ex : variateur de vitesse),

il est possible de travailler à n'importe quel couple quelle que soit la vitesse de travail (le variateur ajustant la vitesse de synchronisme).

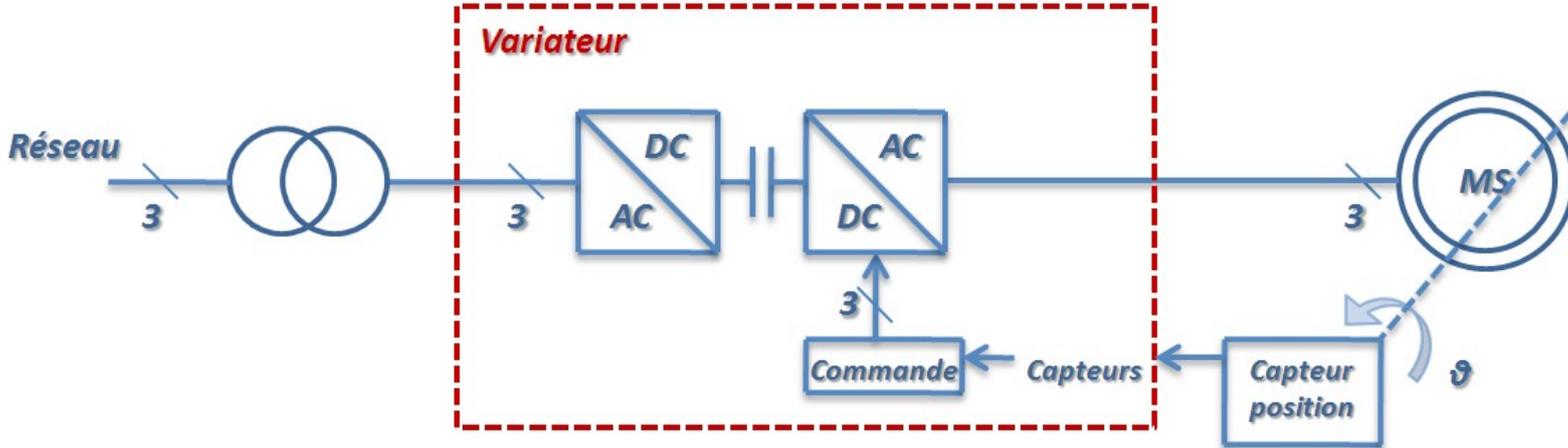


Commande

Une loi de commande 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 :

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \frac{E_v \cdot I_s}{\omega} \cdot \cos(\psi)$$



L'électronique de puissance d'un variateur est la même pour une MS et une MAS.
Seules les lois de commande diffèrent.
Toutefois la MS doit forcément utiliser un capteur de position.



Altivar 71plus
de Télémécanique
(90-200 kW)

Gamme Lexium
de Télémécanique
pour Brushless



Les machines synchrones sont très répandues dans les domaines de la **production** (centrales électriques, éolien, hydraulique, ...) et dans les domaines d'applications exigeant un **encombrement et un poids réduit** (aéronautique, automobile, ...).

Les gros alternateurs possèdent un excellent rendement (~99% pour une MS de 1 GW).

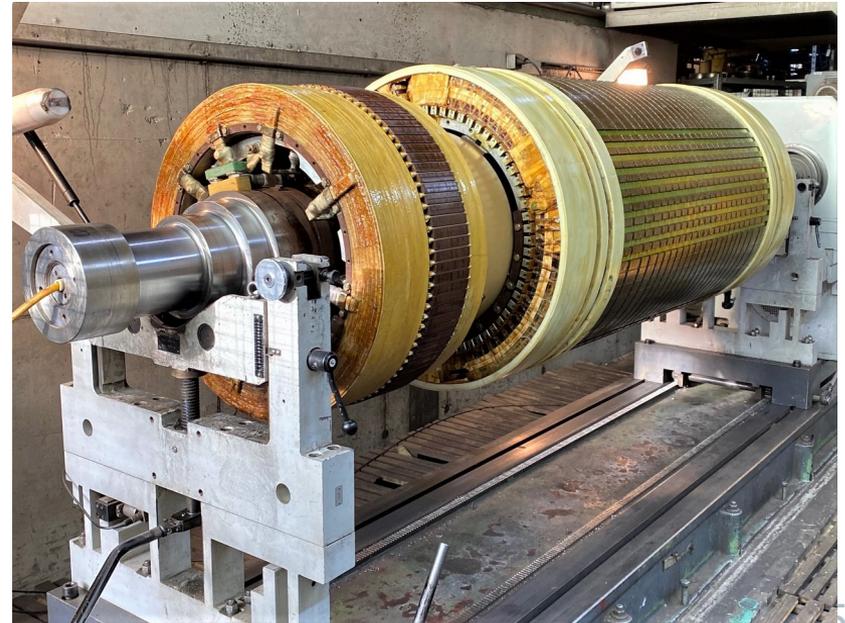


Alternateur
Synchrone

11380 kVA
11000 V
50 Hz, 2 paires de pôles
1500 rpm
35.3 tonnes

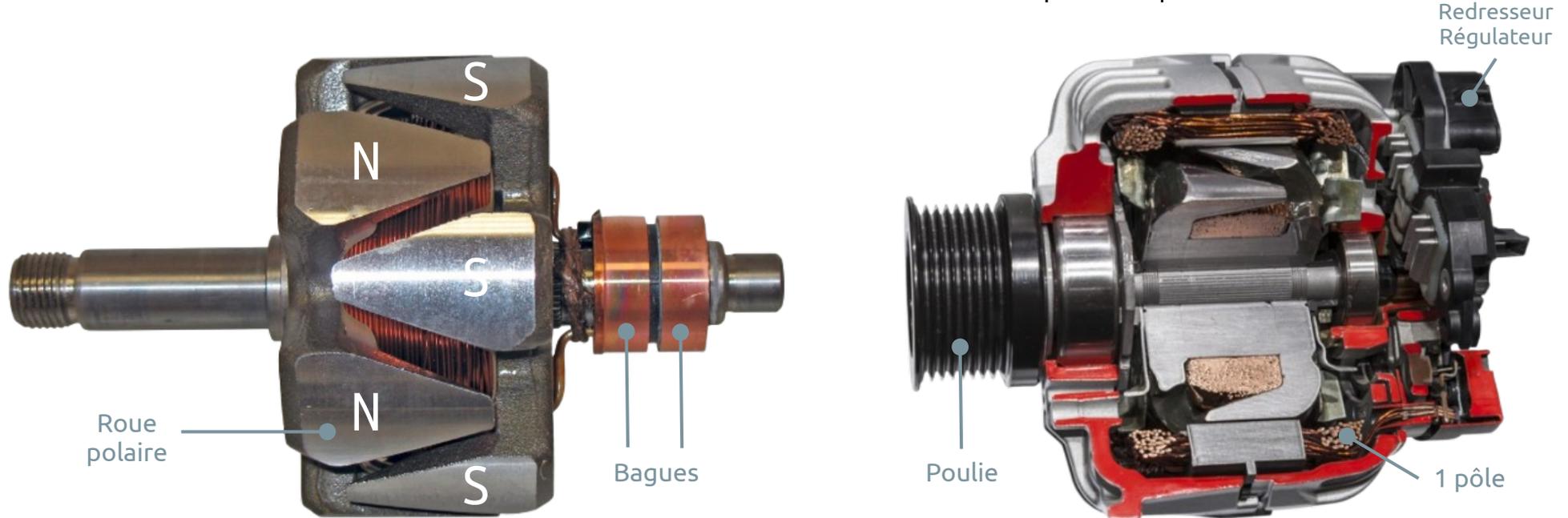
Centrale de biomasse
(litière de poulaillers)
en Écosse

<https://www.menzel-motors.com/details-for-generators/synchronous-generator/>



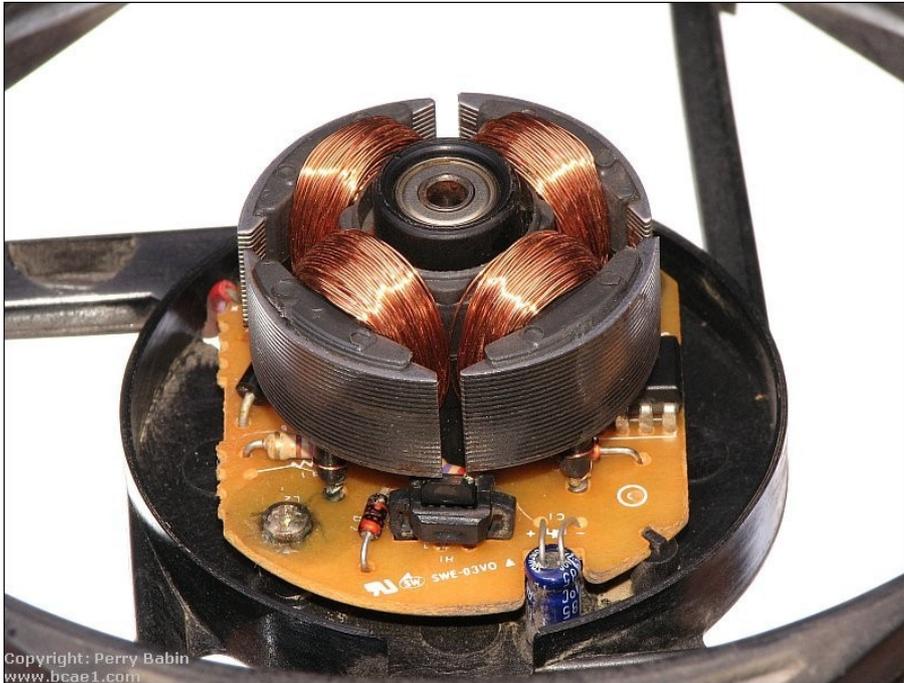
Exemple d'application : l'alternateur de voiture.

Le rotor bobiné est alimenté par la batterie pour faire l'induit. Une roue polaire (rotor à griffes) est utilisée pour augmenter virtuellement le nombre de paires de pôles. Le courant triphasé généré au stator est redressé, et un régulateur vient ajuster l'induction au rotor en fonction de la vitesse de rotation de sorte à conserver une tension produite quasi-constante.



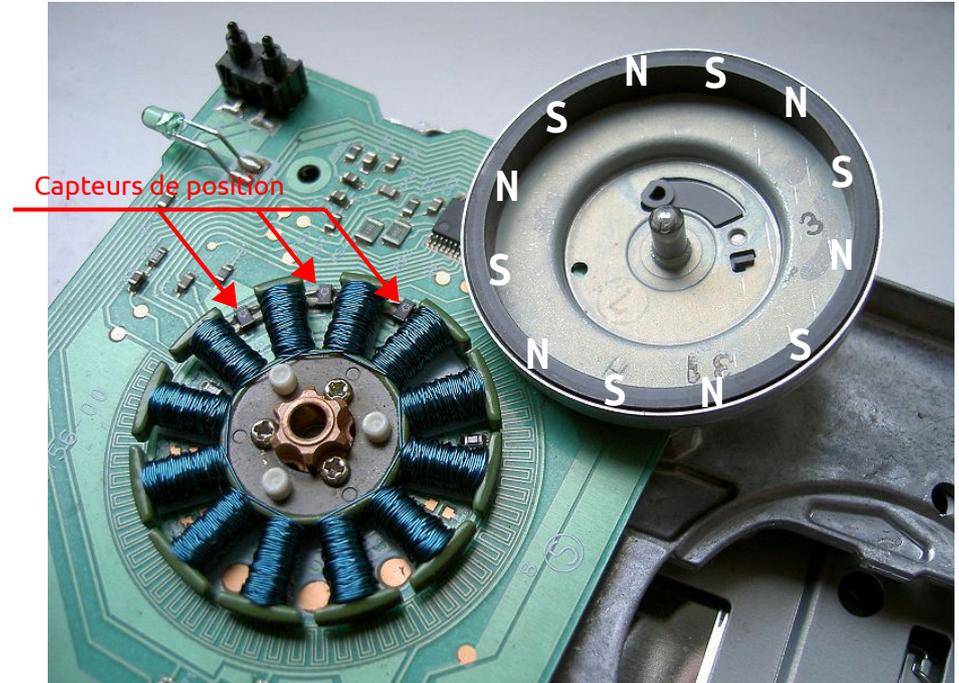
Exemple d'application : BLDC à rotor externe

Les moteurs Brushless (BLDC motor) sont utilisés dans des applications à faibles puissance et coût. La particularité de certains BLDC est que le rotor se trouve à « l'extérieur » (pales) tandis que le stator se trouve à « l'intérieur » (arbre fixe).



Copyright: Perry Babin
www.bcae1.com

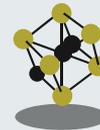
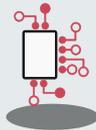
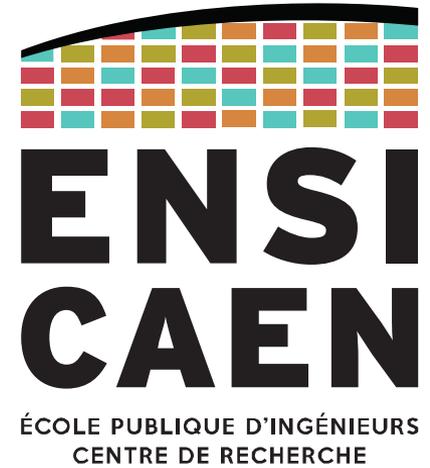
Enroulements et circuits de commande d'un BLDC de ventilateur



Stator et rotor d'un lecteur de disquettes

SYNTHÈSE

Comparaison



Machine Asynchrone

Stator

Rôle = inducteur

Enroulements triphasés à ω_s + CM feuilleté

Rotor

Rôle = induit

Enroulements triphasés à ω_r par un système {bagues + balais}
Ou courants induits dans la cage d'écureuil

Arbre

Vitesse de rotation $\Omega = (\omega_s - \omega_r) / p \rightarrow$ glissement
Couple dépendant de la vitesse (C diminue avec Ω)

Pilotage direct via réseau possible, mais généralement par variateur

Machine Synchrone

Stator

Rôle = induit

Enroulements triphasés à ω_s + CM feuilleté

Rotor

Rôle = inducteur

Enroulement en DC ($\omega_r = 0$) par un système {bagues + balais}
Ou par aimants permanents

Arbre

Vitesse de rotation $\Omega = \omega_s / p \rightarrow$ synchronisme
Couple indépendant de la vitesse (C constant $\forall \Omega$)

Pilotage obligatoirement via variateur

Machine Asynchrone

En production

Utilisation en déclin

En motorisation

Très répandu (industrie, domestique, ...)
Faibles à très fortes puissances

Rendement

Correct à très bon (75 % en faible puissance, 96 % en haute P)

Coût

Prix moins élevé (surtout rotor à cage)

Robuste et peu d'entretien (rotor à cage)

Machine Synchrone

En production

Quasi-monopole (alternateurs éoliens, centrales, ...)

En motorisation

Applications spécifiques.
Moyennes à fortes puissances.

Rendement

Bon à excellent (95 % en motor. indus., à 99 % en alternateur)

Coût

Prix élevé (surtout rotor à aimants permanents)

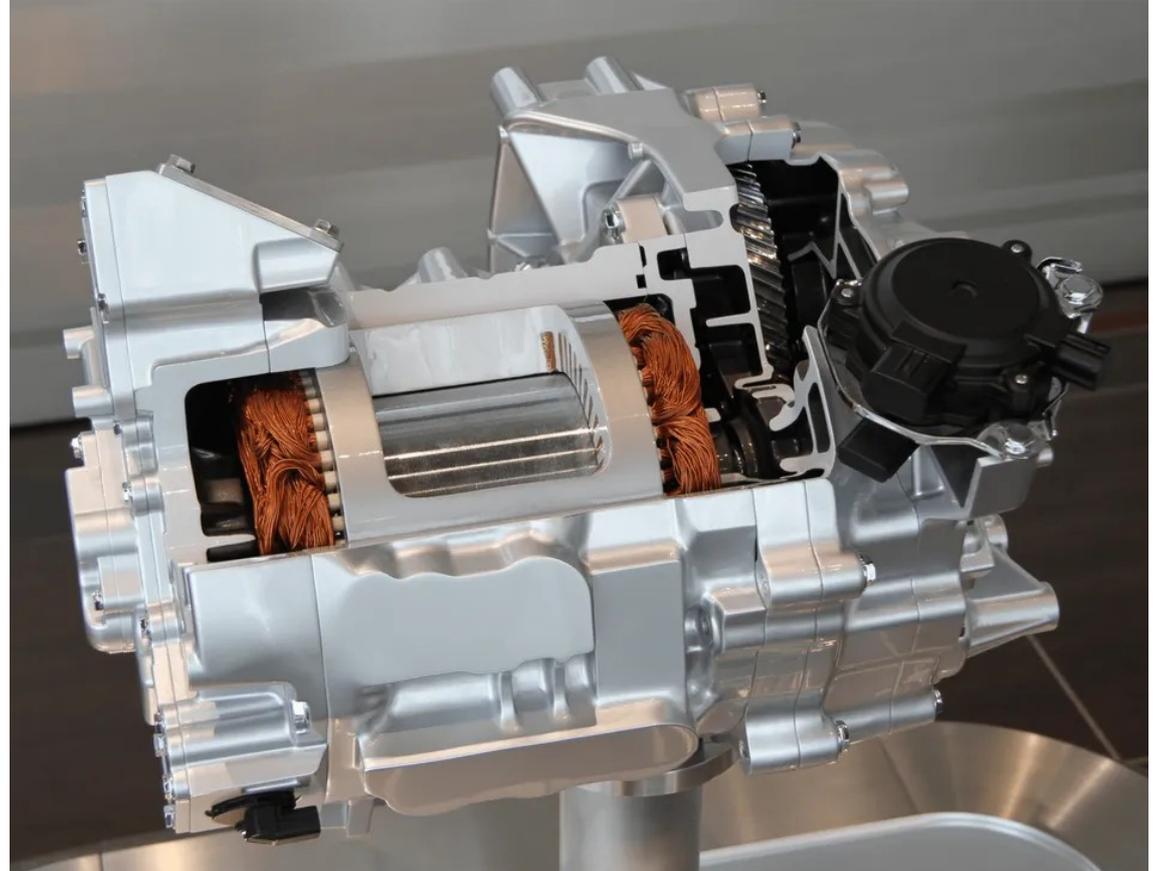
<https://www.youtube.com/watch?v=zbXbAcmMY8U>

Audi Electric Motor (MAS)

Renault Dacia Electric Motor (MS à rotor bobiné)

<https://www.youtube.com/watch?v=NSe8vDm1EZw>

Nissan Electric Motor (MAS)



Nissan EM61 Motor

Sans rentrer dans le détail, certaines applications particulières ont mené à une évolution des moteurs électriques.

Prenons par exemple le moteur utilisé dans la Tesla Model 3 ou la Tesla Model S :

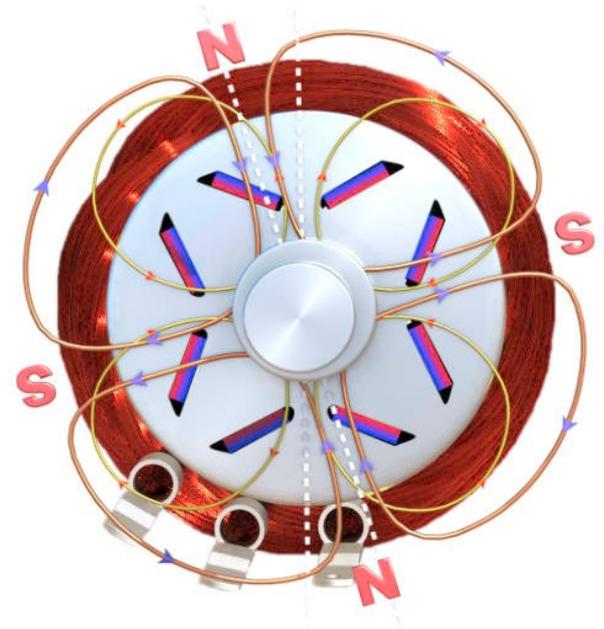
Le IPM-synRM (*Internal Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor*)

Tesla Model 3's motor - The Brilliant Engineering behind it (12:07)

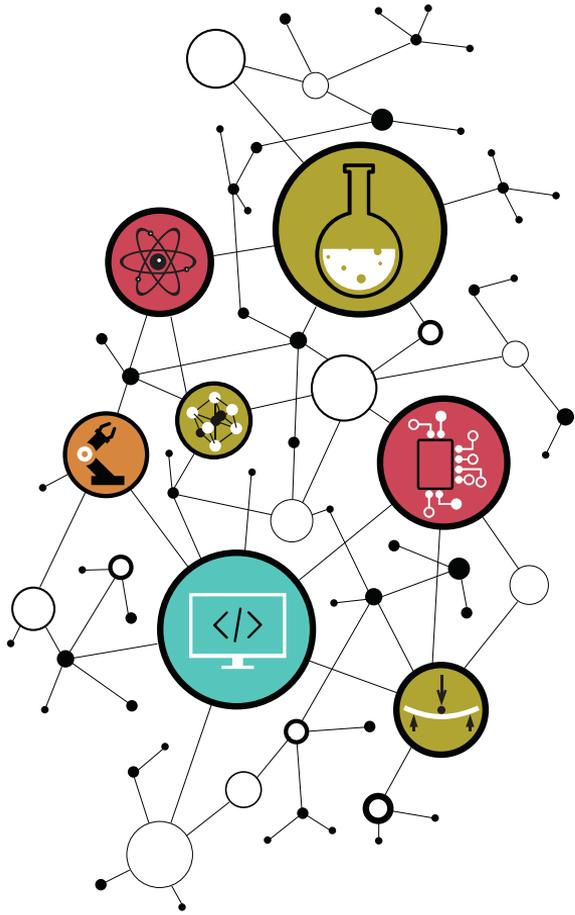
<https://www.youtube.com/watch?v=esUb7Zy5Oio>

Model 3 Vs Model S Motor (7:24)

<https://www.youtube.com/watch?v=bNgB5z4MWRI>



CONTACT



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN
dimitri.boudier@ensicaen.fr

