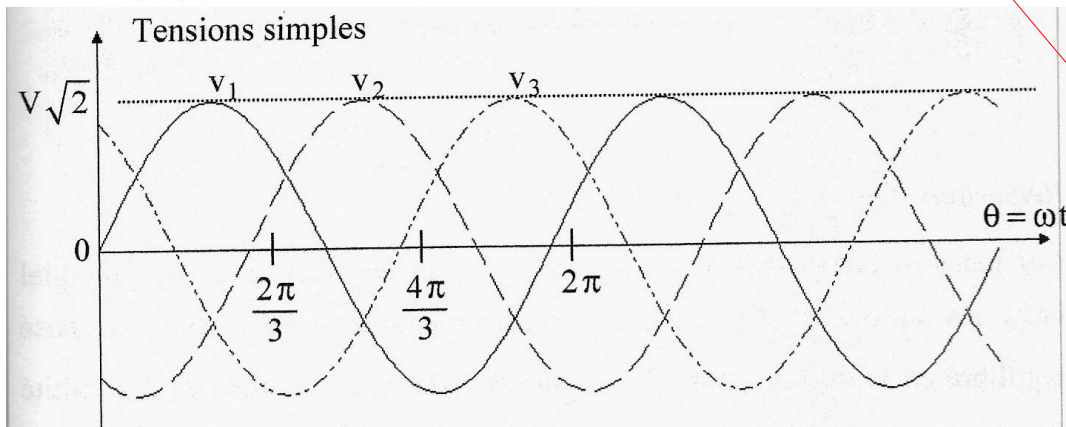
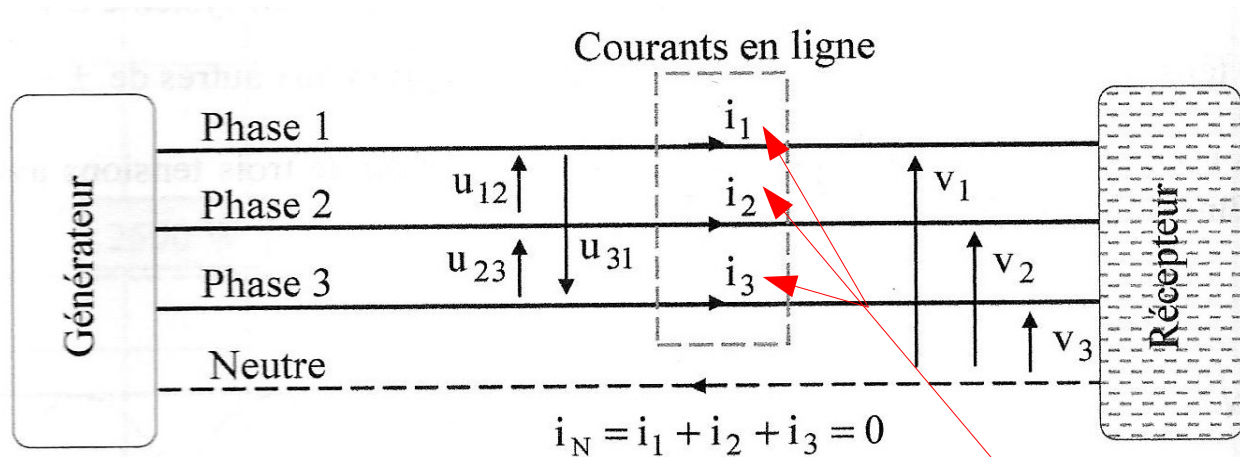


Réseau triphasé équilibré



$$v_1 = V \sqrt{2} \cos \omega t$$

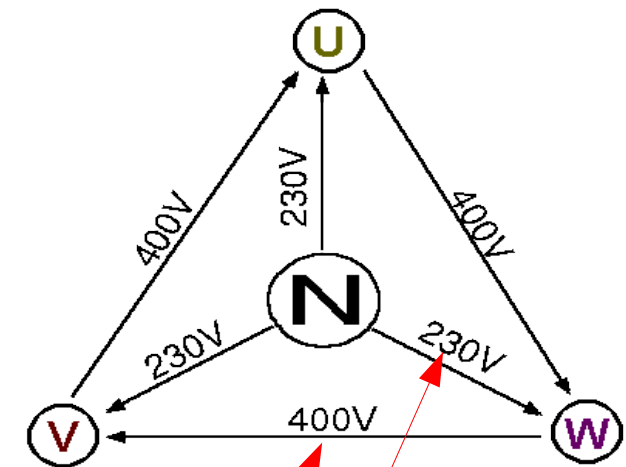
$$v_2 = V \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$v_3 = V \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Tension entre 2 phases
(valeur efficace) :

$$U = V \times \sqrt{3}$$

(EDF : $U = 400 \text{ V}$)



Bornes d'une prise
triphasée et tensions
efficaces entre les bornes

Puissance (en W) :

$$P = U I \sqrt{3} \cos \varphi$$

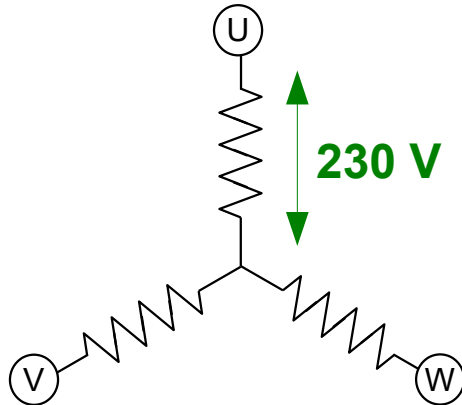
φ :
déphasage
entre
courant et
tension

facteur de puissance
(toujours < 1 !)

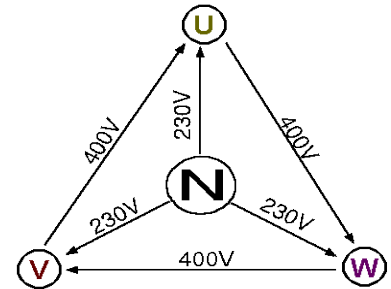
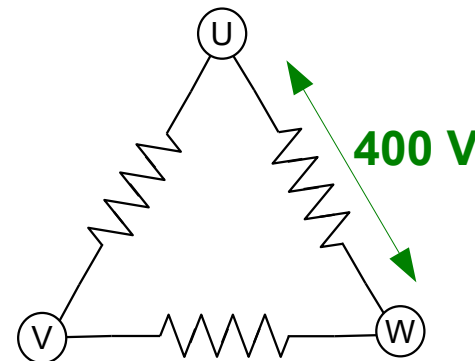
Réseau triphasé équilibré

Branchement d'une machine triphasée :
deux possibilités

étoile



triangle



Exemple sur réseau
EDF 230/400 V

+ fort ← Courant (A) dans les bobinages → + faible

MÊME PUISSANCE dans les deux cas

$$(P = U I \sqrt{3} \cos \varphi)$$

**V.E. : toujours en triangle car
moins de pertes Joule
(à puissance égale)**



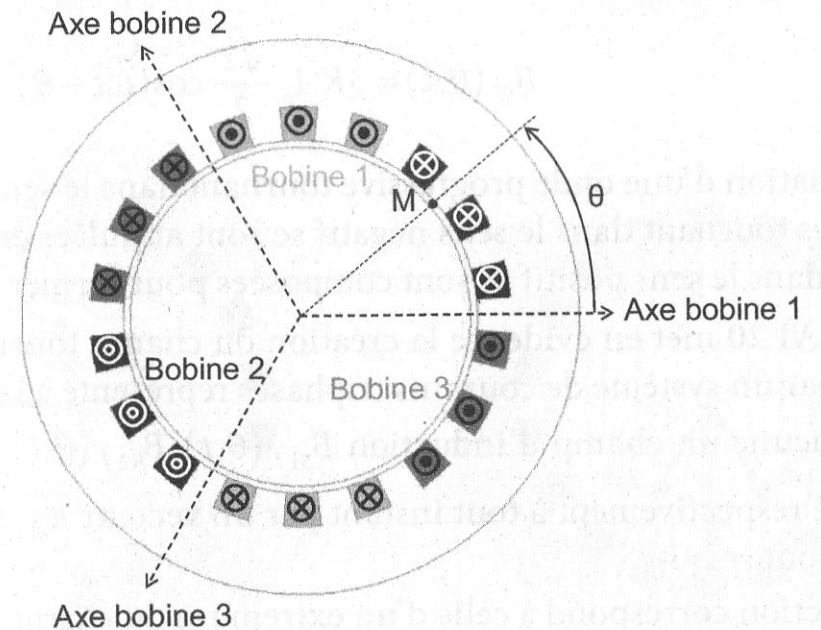
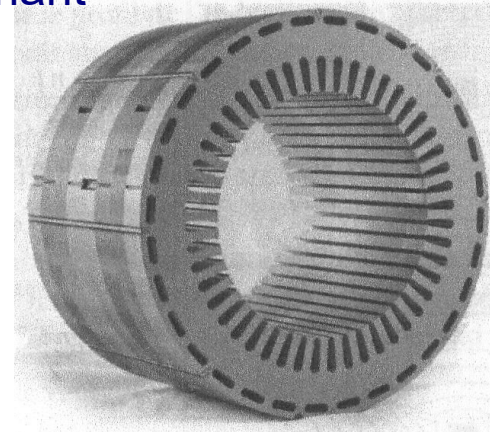
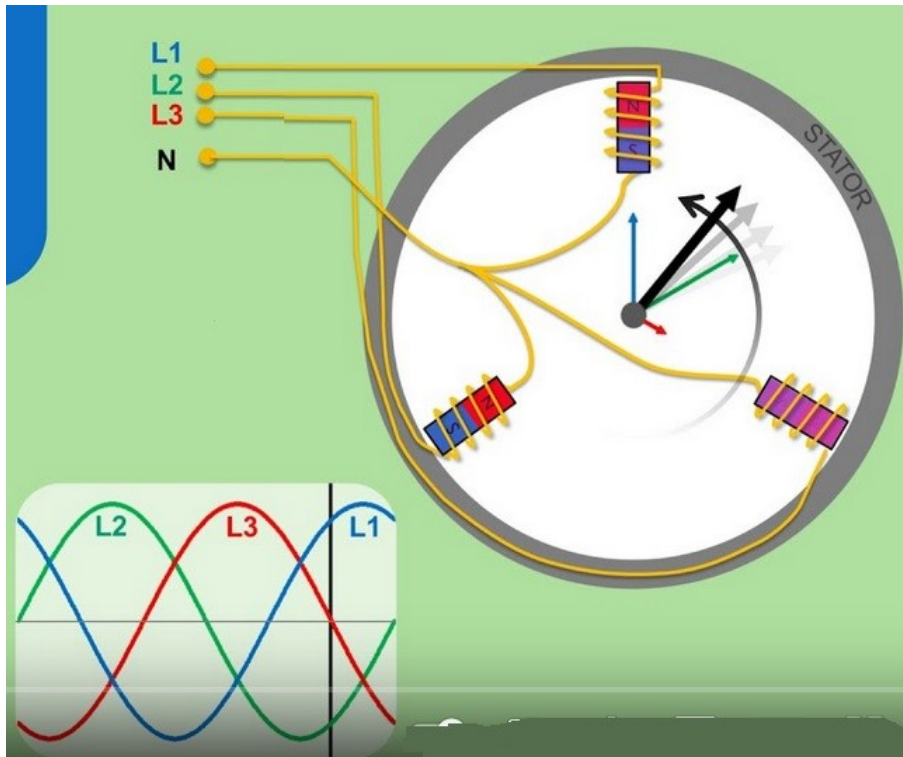
U : Tension entre phases
 I : courant en ligne (U, V ou W)

Champs magnétique tournant

Champs magnétique tournant

Machines réelles :

Bobines alimentées en triphasé et champs magnétique tournant



faire calculer V_{rot} (B) en tr/min si $f_{alim}=50$ Hz ?!!

Machines synchrones et asynchrone

Principe de base

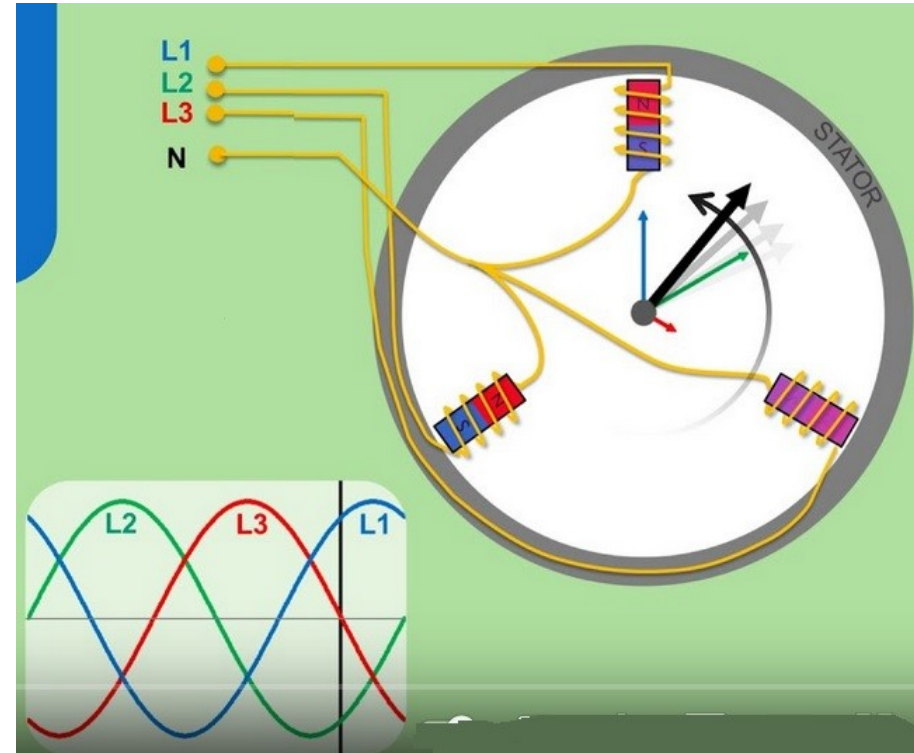
Interaction entre un **champs magnétique tournant** et :

Un **aimant permanent** (ou un électroaimant)

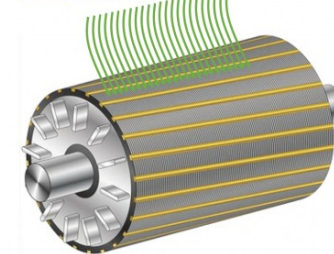
→ **Machines synchrones** (MSAP, MSRB)

Un **circuit fermé** sans source de tension (« cage d'écureuil »)

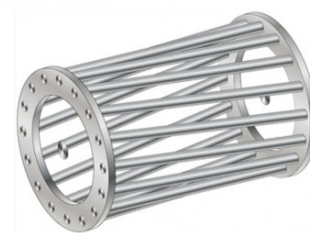
→ **Machines asynchrones** (MAS)



couches d'acier laminé

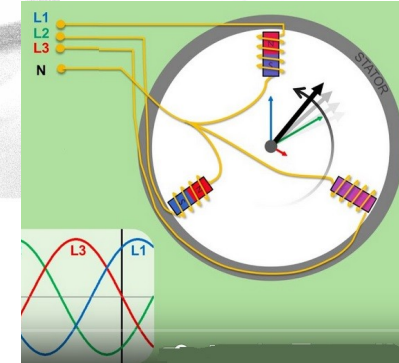
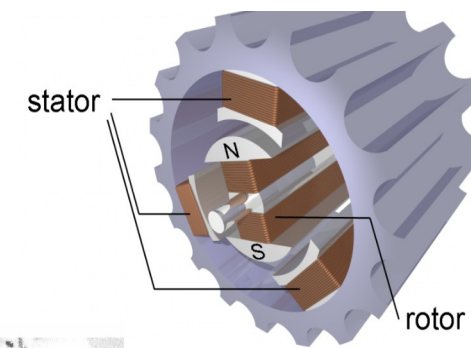
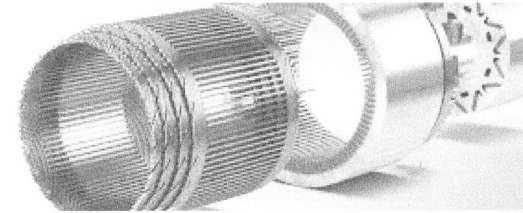


sans couches d'acier laminé

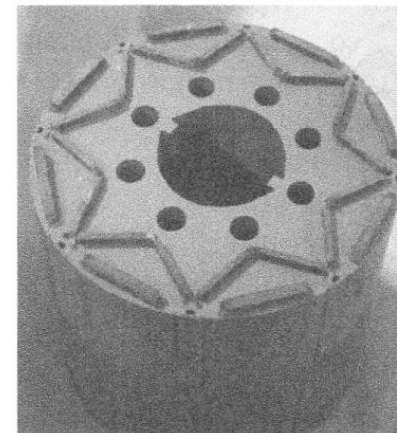
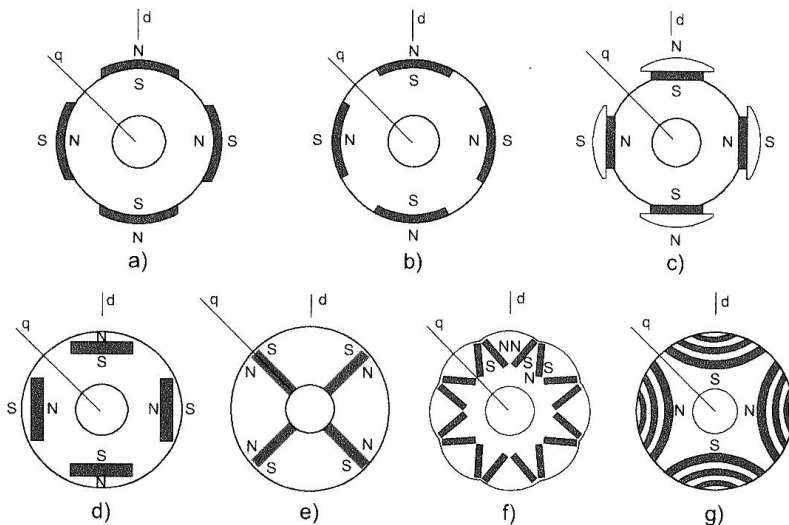


Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)

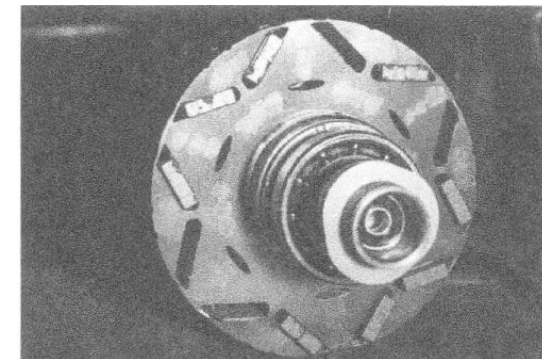
- **Stator** (circuit d'induit) :
 - Bobines alimentés en alternatif triphasé
 - Créent le champs magnétique tournant



- **Rotor** (circuit inducteur) constitué d'aimants permanents (moteurs actuels : Néodyme-Fer-Bore)

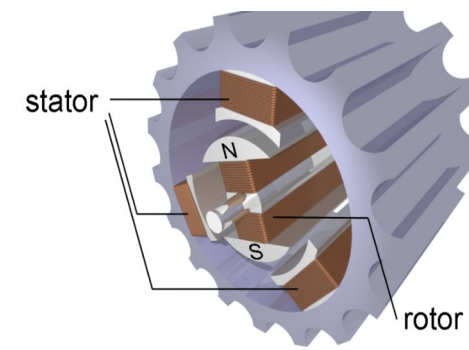


Rotor de la Leaf 2012
(avec ses aimants)



Rotor du moteur à aimant
de la tesla Model 3

Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)



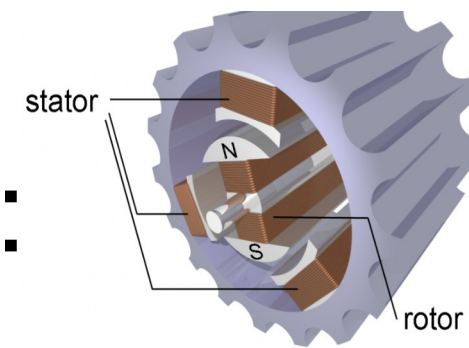
- 93 % des moteurs de V.E. (dont véhicules hybrides)



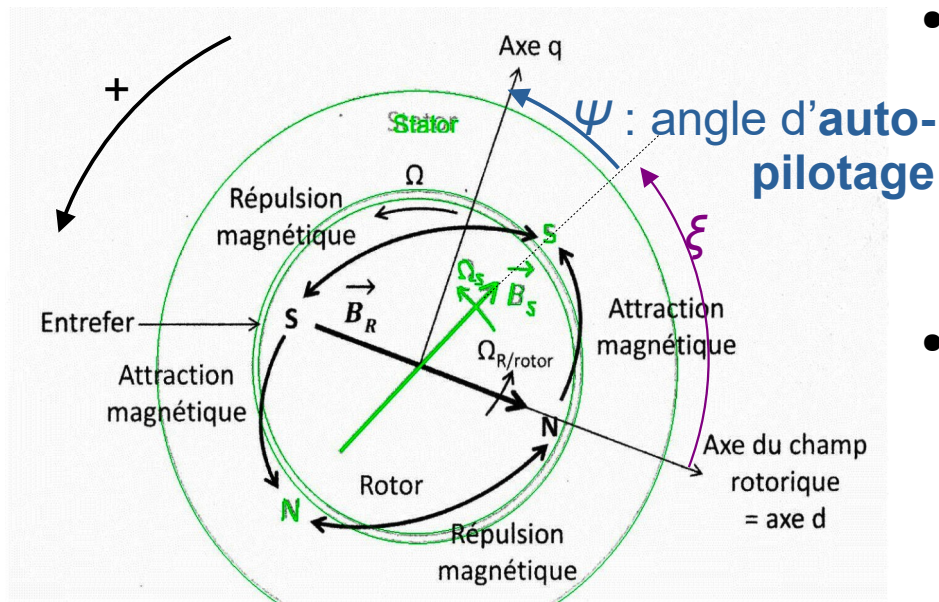
Figure 2.1 – De gauche à droite : Leaf, BMW i3, Prius, Tesla Model 3 [8]

- **Intérêts** (/autres types de moteurs : MSRB, MAS, etc...) :
 - **Excitation ne consomme pas d'énergie**
 - **bon rendement** sur certaines plages de couple-vitesse
 - pour une batterie donnée (quantité d'énergie stockée), **plus d'autonomie**
 - **Compacité**
 - A puissance et couple maxi donné, moteur **plus léger** et **moins volumineux**
- **Inconvénient** :
 - Aimants type $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$: **Terres rares** !
 - **PRIX** (30 % du prix du moteur)
 - pas si rares (prévisions : 50 à 500 ans) **MAIS 80-90 % des réserves en Chine**

Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) : Création du couple



Lien [champ_trn_m_synch-Film-aimant.mov](#) (éditer lien --> changer lettre lecteur)

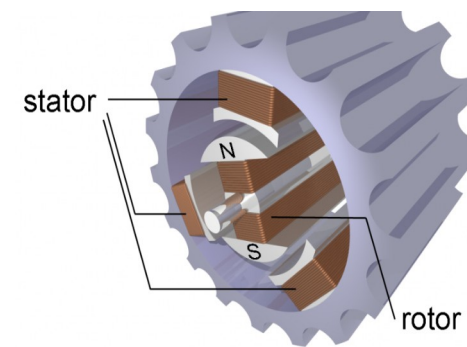


- **Couple créé par attractions/répulsions** entre les pôles du rotor (aimant) et ceux du stator
- **L'angle ξ entre l'axe d (axe de l'aimant) et le champ statorique B_S est constant, et $\approx 90^\circ \rightarrow$ couple constant**

- Le rotor tourne donc à la même vitesse que le champ magnétique (\rightarrow moteur « synchrone »)

Ret
- al
- F
fur
- M
ma
 B_R

Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)



- Le rotor tourne donc à la même vitesse que le champs magnétique (→ moteur « synchrone »)

n en $\text{tr} \cdot \text{s}^{-1}$ ou en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$,
ou Ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Stator alimenté par une tension de fréquence f :
1 tour pendant 1 période
→ fréquence f (Hz) = vitesse rotation champs magnétique en tour par seconde

$$\Rightarrow n = f \text{ (avec } n \text{ en tr/s)}$$

- relations plus utiles :

$$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow \Omega = 2\pi f \leftarrow \text{Hz}$$

$$\text{tr} \cdot \text{min}^{-1} \rightarrow n = 60 \times f \leftarrow \text{Hz}$$

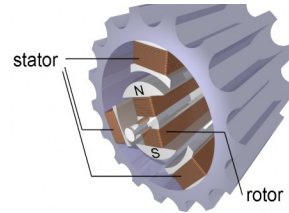
Trous à remplir

$$(\text{car } n[\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}] = 60 n[\text{tr} \cdot \text{s}^{-1}])$$

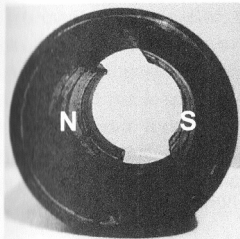
(Relations à NE PAS retenir : retenir que le rotor tourne à la même vitesse que le stator, et savoir passer des $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ aux $\text{tr} \cdot \text{s}^{-1}$ et aux $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, et vice-versa....)

MSAP

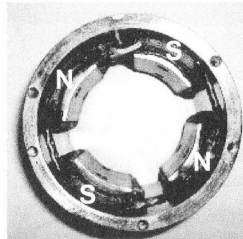
Rappel : $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1} \rightarrow n = 60 \times f \leftarrow \text{Hz}$ Si une seule paire de pôle au rotor et une seule au stator (« $p = 1$ »)



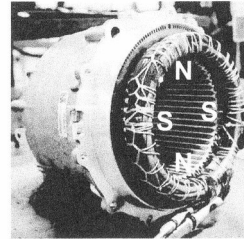
Si plusieurs paires de pôles au stator ou au rotor ?



1 paire de pôles

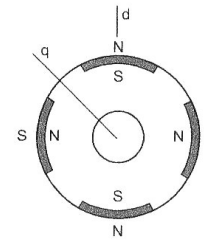


2 paires de pôles

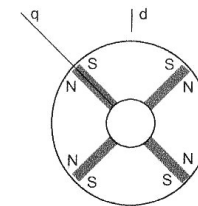


2 paires de pôles

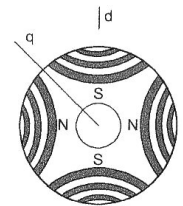
Figure A1.11 – Exemples de stators - 2 aimants (gauche) [1] ; 4 bobines concentrées sur des noyaux polaires (milieu) [1] ; 3 bobines réparties dans des encoches (créant ici deux paires de pôles) [2]



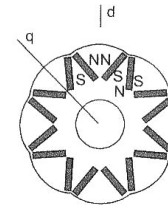
2 paires de pôles



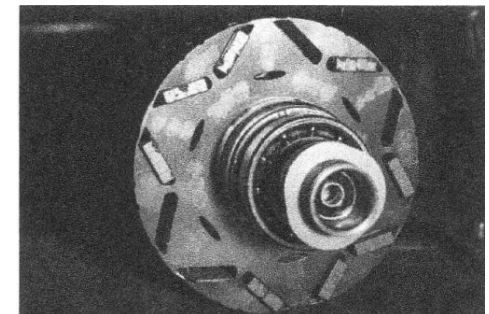
2 paires de pôles



2 paires de pôles



8 paires de pôles



6 paires de pôles

MSAP

Rappel : $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1} \rightarrow n = 60 \times f \leftarrow \text{Hz}$ Si une seule paire de pôle au rotor et une seule au stator (« $p = 1$ »)

Si plusieurs paires de pôles au stator ou au rotor ?

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

Nombre de paires de pôles total (rotor + stator)

Intérêt ?

- Le rotor tourne **p fois moins vite...** Mais il produit **p fois plus de couple !** (car p fois plus d'aimants subissant l'A.M.)
- Couple **mieux réparti** sur le rotor (subit moins de contraintes mécanique internes)

Exercice (à faire...) : Moteur VE 1 paire de pôles au rotor et 6

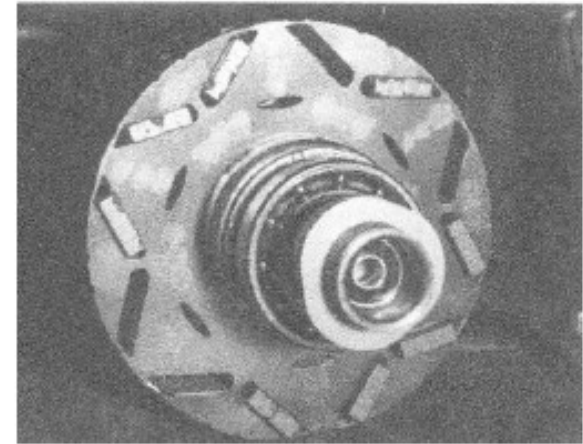
MSAP

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

Exercice 2: Tesla Model 3

La Tesla Model 3 Standard est motorisée par un moteur synchrone à aimants permanents dont le rotor est doté de six paires de pôles (voir photo). Le stator est constitué de 3 bobines alimentées en triphasé.

Quand ce moteur tourne à $9000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ (ce qui correspond à une vitesse de l'ordre de 100 km/h), à quelle fréquence sont alimentées les bobines du stator ?

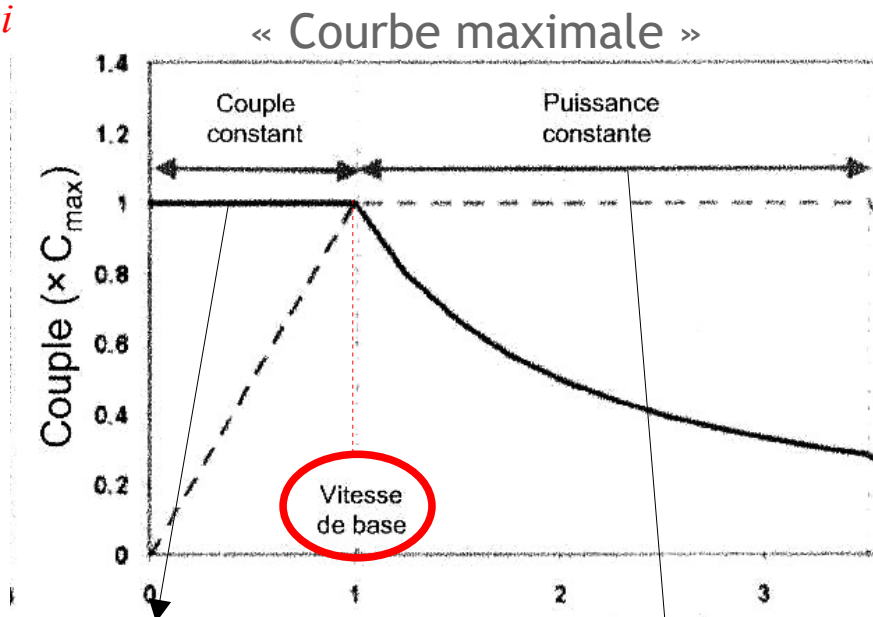


$$9000 \text{ tr/min} = 150 \text{ tr/s}$$

$$\rightarrow f = p \times n \text{ (si } n \text{ en tr/s...)} \rightarrow f = 6 \times 150 = \mathbf{900 \text{ Hz}}$$

MSAP

Courbe de couple/puissance typique d'un moteur synchrone:



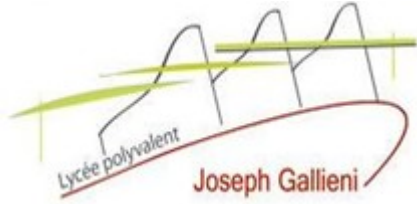
On maintient I_s constant en augmentant U au fur et à mesure qu'on augmente f (\rightarrow permet $\psi = 0$)

zone de défluxage :
 U est à son maximum (ψ augmente \rightarrow couple diminue)

- courbe « pédale à fond »
(// thermique : papillon des gaz 100 % ouvert au max, cf TP MCC)
- Moteurs **pilotés en couple** (position pédale \leftrightarrow valeur de couple demandée)
 \Rightarrow commande à **intensité de courant I_s (stator) constante** (valeur efficace)
(I_s // ouverture papillon des gaz...)
 \Rightarrow Changement de **vitesse** : la commande **adapte la valeur f** de la tension d'alim (et sa valeur efficace U !)

NB (pour
- Si plus
de par
..) donne
fonctt

NB (pour moi?) :

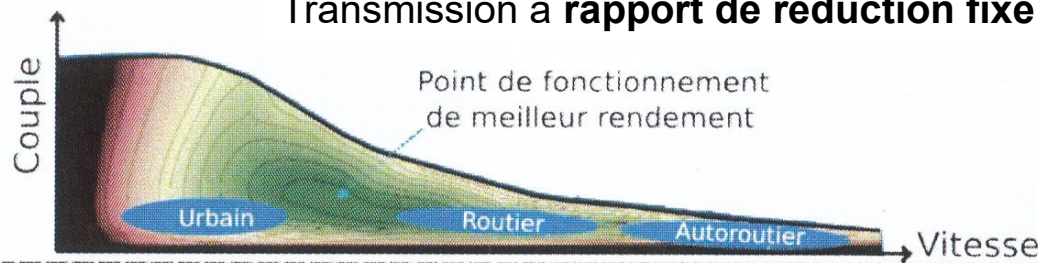


Transmission directe ou boîte de vitesse ?

diapo à caser
où?
OPT, que si
question
émerge !

Cartographies de rendement

Transmission à **rapport de réduction fixe**



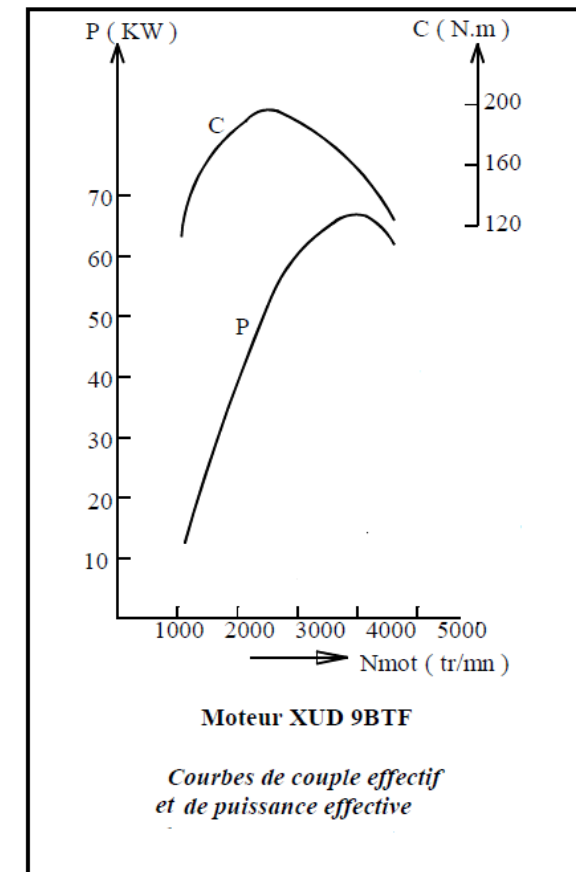
Boîte de vitesse deux rapports



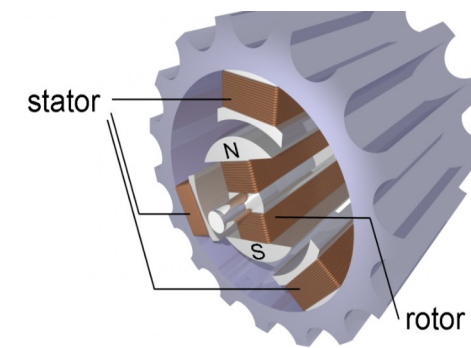
Exemple : Porsche Taycan

- Presque tous les V.E.
- choix le plus économique
- Pas de surpoids → véhicule + léger **ou** OK batterie de plus grande capacité (autonomie)
- ⊕ Meilleur rendement (voir carte) → > 5 % d'autonomie en + (source : ZF)
- ⊕ On peut sous-dimensionner le moteur en couple et en plage de vitesse à puissance maxi → **moteur + léger, + compact, - cher.**
- ⊖ Complexité méca → coût
- ⊖ Surpoids...
- ⊖ « trous » à l'accélération

Courbe de couple/puissance : exemple

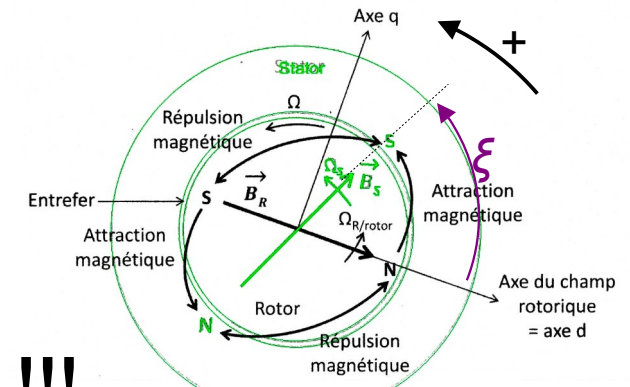


MSAP : Réversibilité



- **Récupération d'énergie** (freinage « moteur ») : dès que le rotor est **en avance** sur le **champs magnétique tournant** (angle ξ négatif : le rotor est attiré dans le sens opposé à la rotation)

→ énergie récupérée recharge la batterie HT



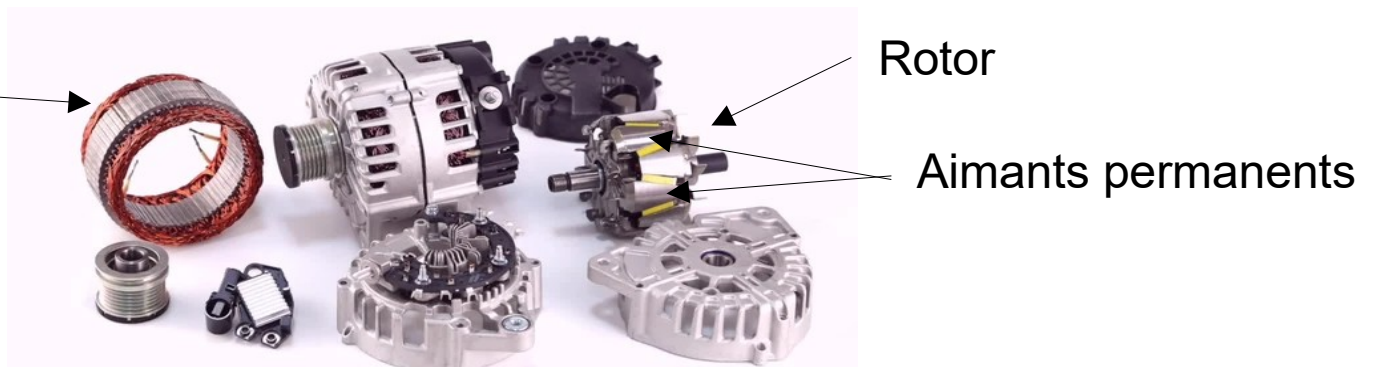
*Refaire avec sch simpl
→ Dessiner dans le se
 $\xi < 0...$*

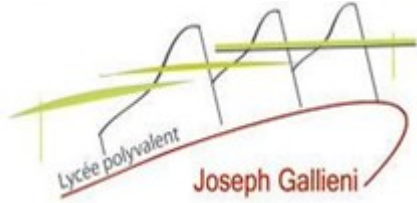
• **MSAP : Machines complètement réversibles !!!**

(Pas besoin d'alimenter le stator pour récupérer de l'énergie électrique : il suffit de faire tourner le rotor....)

→ **UN ALTERNATEUR** (véhicule, centrale électrique, ...) **EST UNE MACHINE SYNCHRONES** fonctionnant en génératrice (\neq moteur)

Bobinage du stator

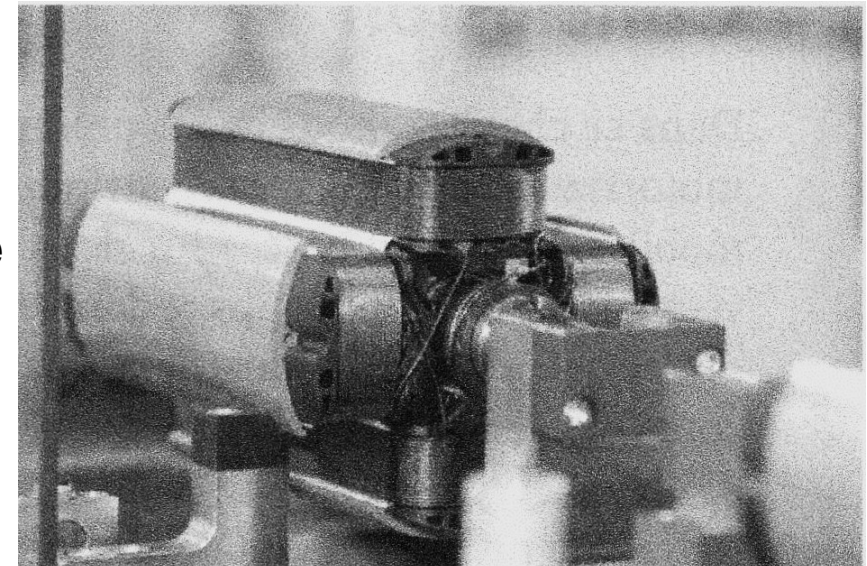
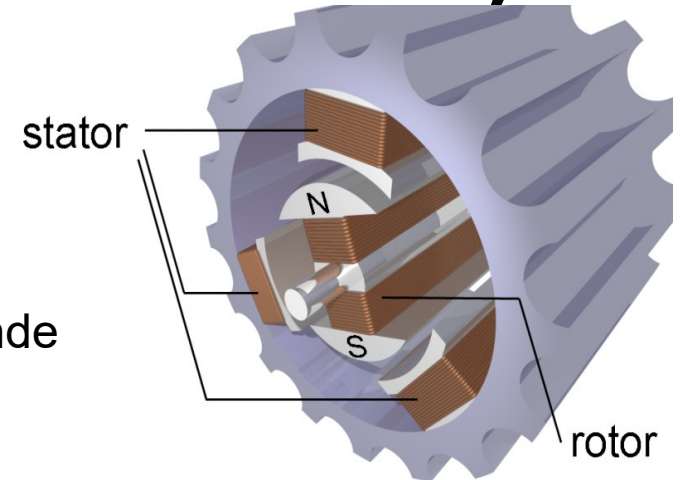




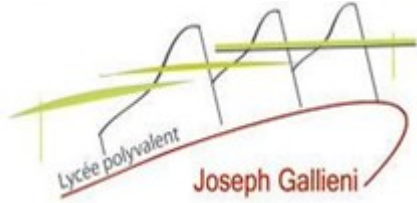
variante : les MSRB

(Moteur synchrone à rotor bobiné)

- Principe : au stator, **bobine(s) alimentées en courant continu** au lieu d'aimants
 - **PAS DE TERRES RARES !**
 - **Un paramètre de plus** pour piloter le moteur (commande à rendement maximal) : **optimisation du rendement** possible dans tout le plan vitesse-couple (rdt global >95 % dans une grande zone)
 - zone de défluxage large (voir caractéristique maximale + loin)
- Inconvénients :
 - Alimenter des bobines en rotation nécessite **système balais / collecteurs**
 - **frottements, usure**
 - fabrication plus difficile donc **plus coûteuse**
 - **Pertes par effet Joule** dans le rotor difficiles à évacuer



Rotor 4 pôles du moteur Renault 5A Gen3 (R240)



variante : les MSRB

(Moteur synchrone à rotor bobiné)

- Peu de V.E. équipé d'un MSRB (à l'heure actuelle) :
 - - **Toutes Renault électriques** depuis 2002 (Kangoo ZE, Fluence ZE, ZOE)
 - sauf Twizy**
 - - **BMW iX3** (SUV)
 - - ... ?
 (aucun véhicule hybride)
 - - Alstom : TGV Atlantique et Sud-Est, locomotive « Sybic »

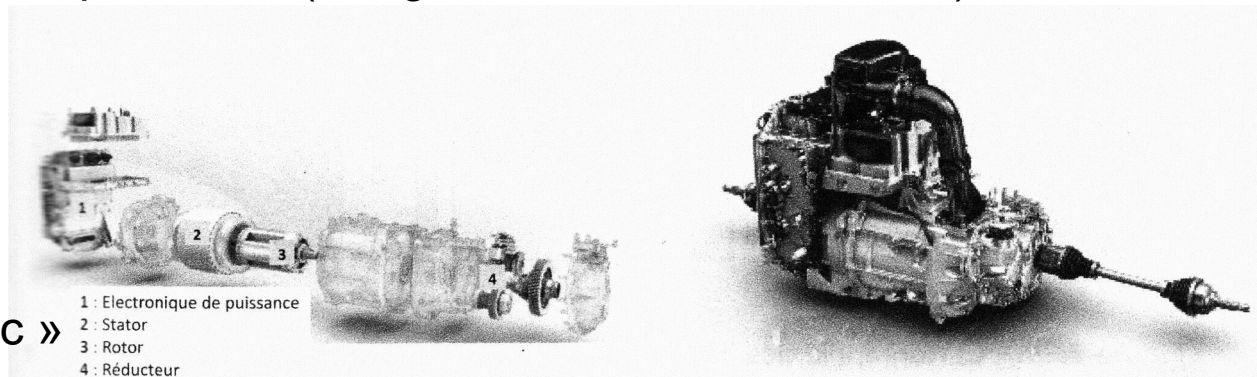
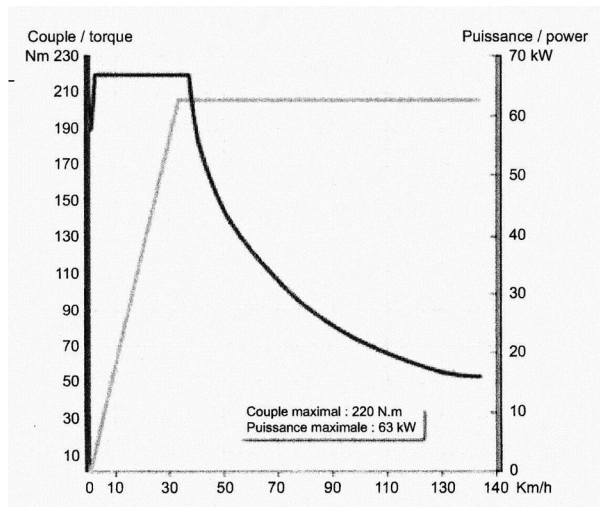


Figure 2.27 – Groupe motopropulseur Renault 5A Gen3 (R240) [37]

• Caractéristique maximale :



Moteur 5A Gen2 de ZOE, fabriqué par Continental

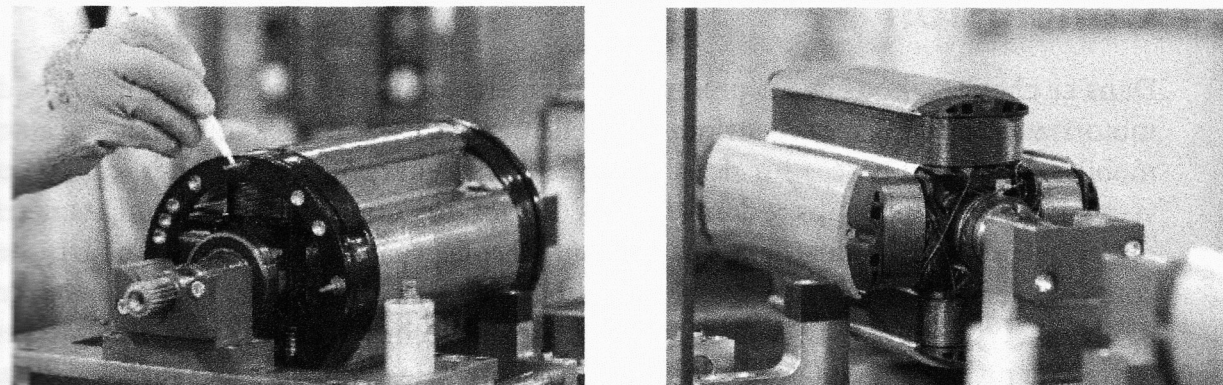


Figure 2.28 – Rotor bobiné 4 pôles du moteur Renault 5A Gen3 (R240) [37bis]

Ce moteur, construit par Renault, équipe tous ses véhicules électriques depuis 2015

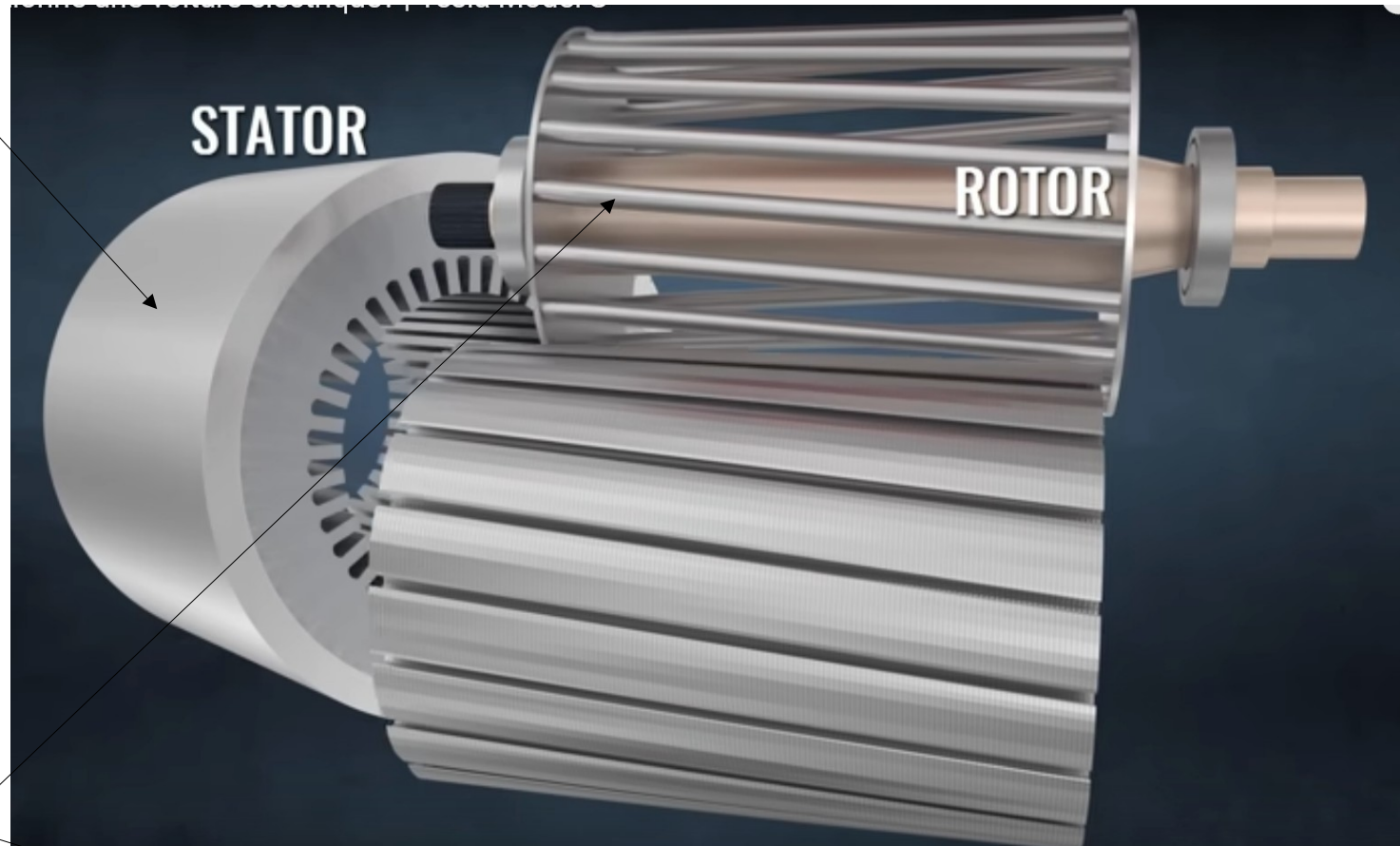
Moteurs asynchrones (MAS) BTS MV

= moteurs à induction (*N. Tesla, 1885*)

Circuit inducteur :

Bobines alimentées en **alternatif triphasé** → Créent un **champs magnétique tournant** (même stator que machines synchrones)

lien [vidéo asynch](#)

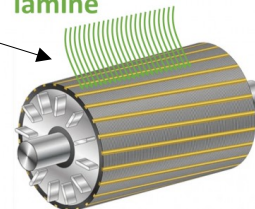


« Cage d'écureuil »

(circuit d'induit):

Constituée de conducteurs fermés sur eux même (Al ou Cu), **non alimentés**, encapsulé dans du matériau ferromagnétique feuilleté

couches d'acier laminé



sans couches d'acier laminé

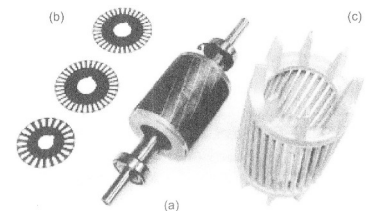
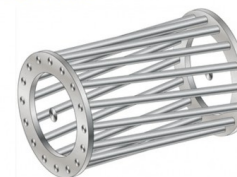


Figure A1.42 – Rotor à cage de machine asynchrone (a). Tôle ferromagnétique du rotor (b). Cage d'écureuil seule (c)

Moteurs asynchrones (MAS) BTS MV

= moteurs à induction (N. Tesla, 1885)

- Cage d'écureuil = **rotor**
« **passif** », en matériau **NON**
ferro-magnétique
→ Pas d'effet du champs
tournant sur le rotor ???
- Si !!! :

**Même non alimenté, du courant
va circuler dans le rotor : les
courants induits par le champs
magnétique tournant (courants
de Foucault) !**

(Encapsulage dans tôles acier laminé :
augmente induction dans cage
d'écureuil – induction trop faible dans Al
ou Cu seul)

lien [vidéo asynch](#)

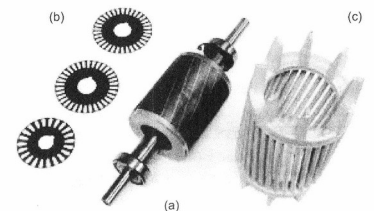
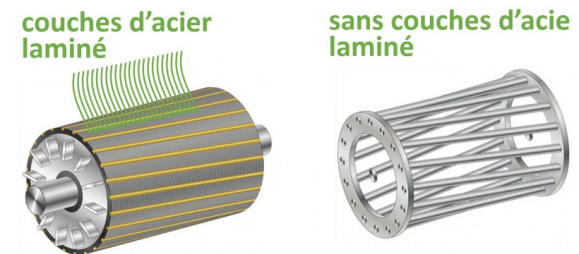
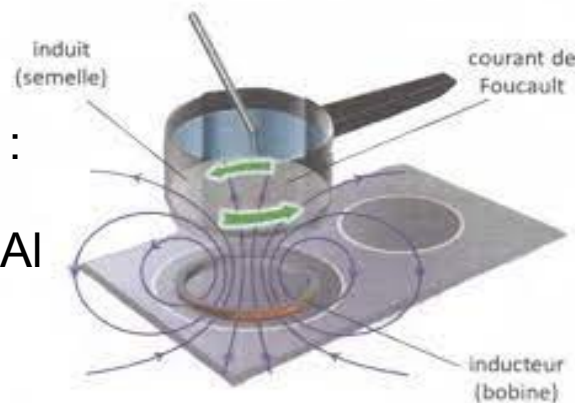
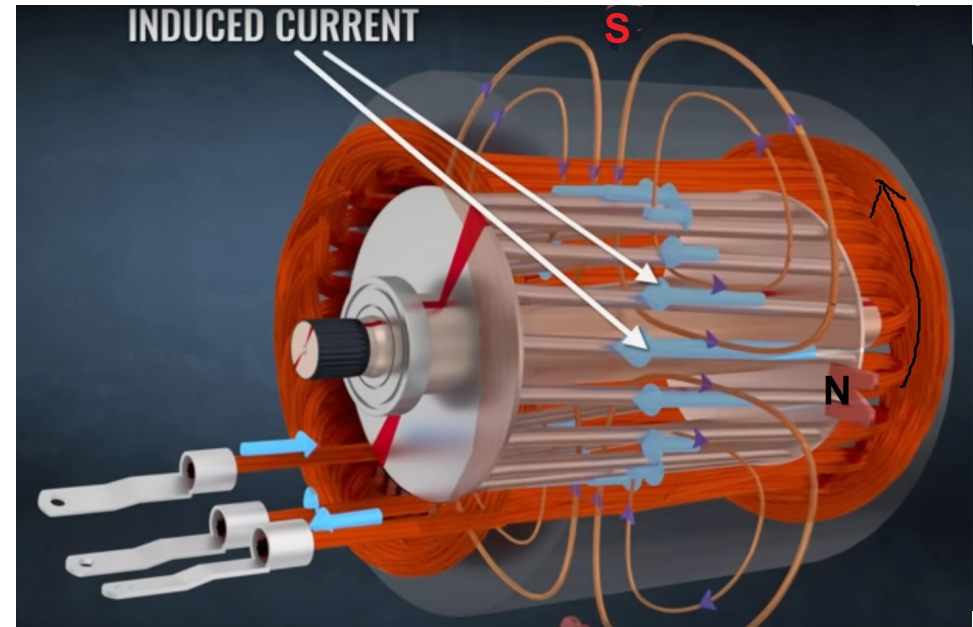


Figure A1.42 – Rotor à cage de machine asynchrone (a). Tôle ferromagnétique du rotor (b). Cage d'écureuil seule (c)

Moteurs asynchrones (MAS) BTS MV

= moteurs à induction (N. Tesla, 1885)

- Véhicules actuels équipés d'un moteur asynchrone:
 - Tesla Model S, X et Y
 - Audi SUV e-tron (moteur APA250)
 - Mercedes Benz EQC
 - Petits véhicules : Renault Twizy, Tuk Tuk électrique
 - Bus Mercedes eCitaro
 - TGV dernière génération (TGV Duplex 2^{ème} génération)
 -

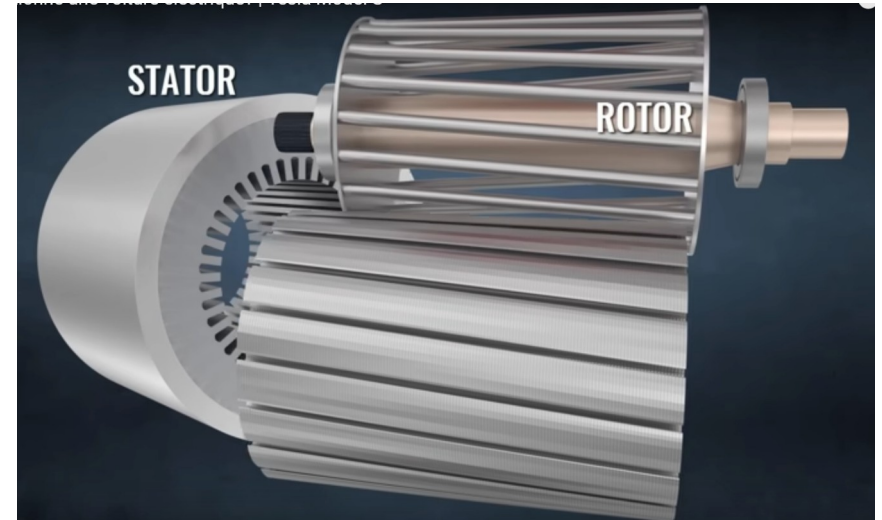


Figure 2.11 – Tesla Model S, Audi e-tron et Mercedes-Benz EQC 400 [21]

- + certains V.E. 4WD :
 - un moteur **synchrone AV** + un moteur **asynchrone AR** (ou l'inverse) ← selon conditions de roulage, profiter des avantages de l'un ou de l'autre
 - exemples : Tesla Model 3 Dual Motor, Toyota Prius 4^{ème} génération version 4WD

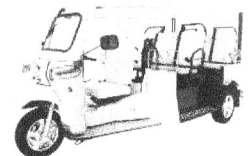
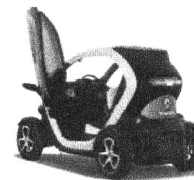


Figure 2.12 – Renault Twizy, Mia et Tuk Tuk électrique [22]

Moteurs asynchrones (MAS) BTS MV

= moteurs à induction (*N. Tesla, 1885*)



Figure 2.11 – Tesla Model S, Audi e-tron et Mercedes-Benz EQC 400 [21]

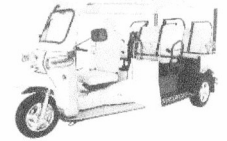
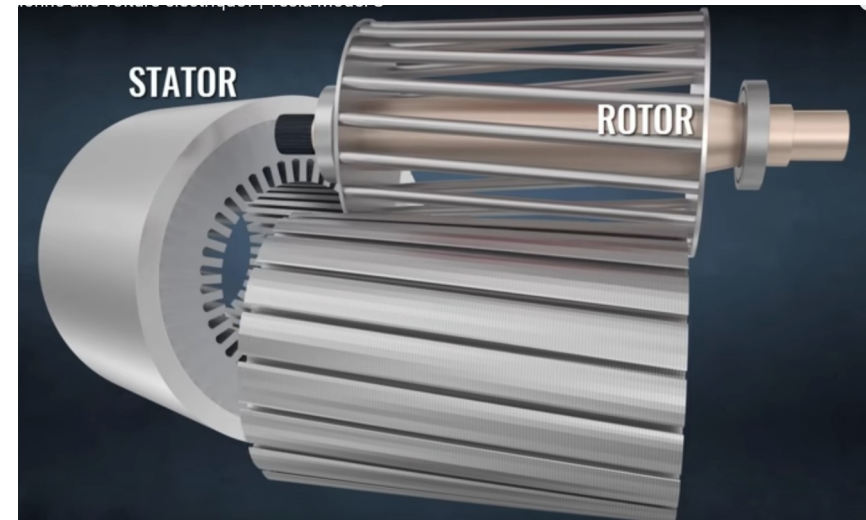


Figure 2.12 – Renault Twizy, Mia et Tuk Tuk électrique [22]

• Avantages :

- Pas d'aimants → **pas de terres rares !**
- Conception simple, expérience de fabrication en série → coût faible ;
- Robustesse mécanique
→ **vitesse rotation maxi > MS**
→ **puissance + élevée** pour moteur de masse comparable (/MS)
- + Robuste vis à vis de défaillance convertisseur de puissance

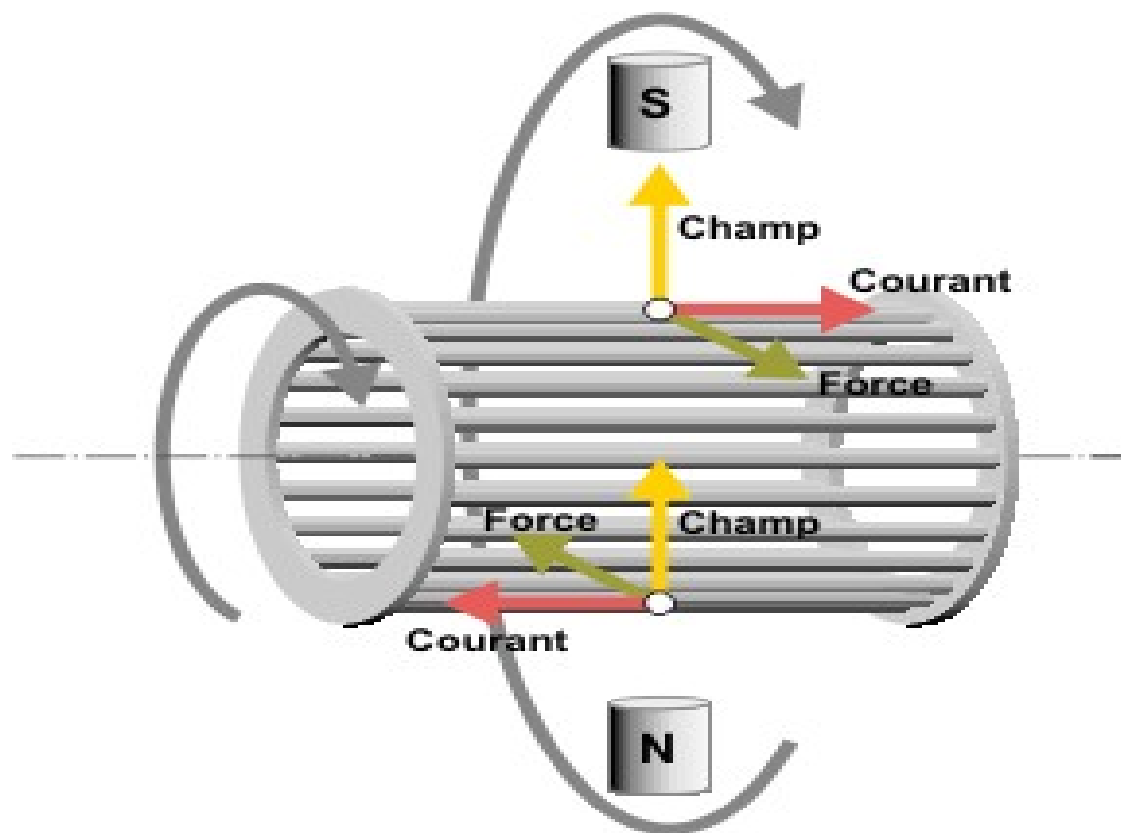
→ Caractéristiques adaptées pour véhicules à fortes puissance et vitesse maxi



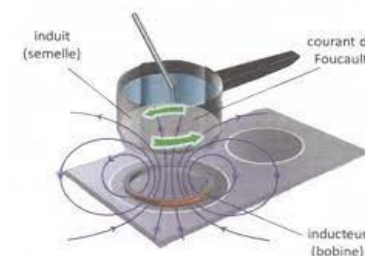
• Inconvénients :

- rendement maxi < MSAP (pertes Joule au rotor...)
- **Pertes Joule** au rotor difficiles à évacuer...
- Puissance maxi + élevée que MS, mais plage de vitesse à puissance maxi + restreinte (voir exemples de courbes de puissance + loin)

Création du couple



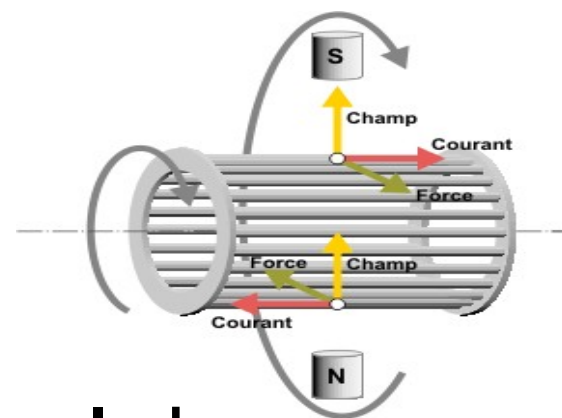
Le courant est créé par la ROTATION du champs magnétique / rotor (courant de Foucault)



L'interaction entre le **courant dans le rotor** (courant induit) et le **champs magnétique** créé par le stator crée une **force de Laplace**, donc un COUPLE permettant la ROTATION DU ROTOR
→ Le rotor part « à la poursuite » du champs magnétique tournant

création du couple et glissement

- L'interaction entre le **courant dans le rotor** (courant induit) et le **champs magnétique** créé par le stator crée une **force de Laplace**, donc un COUPLE permettant la ROTATION DU ROTOR
→ Le rotor part « à la poursuite » du champs magnétique tournant
- Mais le rotor n'arrive **jamais** à tourner **aussi vite** que le champs magnétique : en effet, **si c'était le cas**, le rotor verrait un **champs magnétique fixe** !
 - ⇒ plus de courant de Foucault
 - ⇒ plus de force de Laplace ⇒ donc **plus de couple** !
- Un équilibre s'établit à une **vitesse < vitesse de rotation du champs magnétique** (= vitesse de synchronisme)



« glissement »

Moteurs asynchrones (MAS) BTS MV

création du couple et glissement

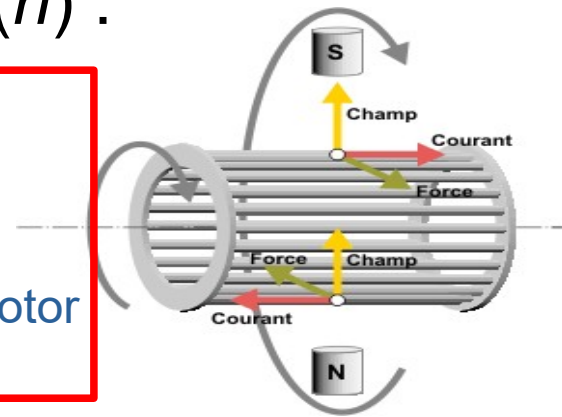
- Un équilibre s'établit à une **vitesse < vitesse de rotation du champs magnétique** (vitesse de synchronisme)
- **GLISSEMENT = différence de vitesse de rotation** entre le champs magnétique du stator (n_s) et le rotor (n) :

glissement
(sans unité)

$$g = (n_s - n) / n_s$$

vitesse de synchronisme (en
tr/min, ou en rad/s, ou en tr/s)

vitesse de rotation du rotor
(même unité que n_s)

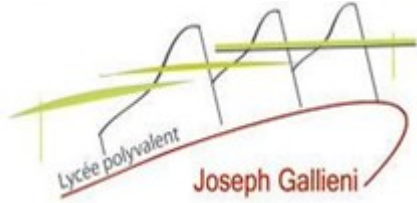


- g est faible en régime permanent (en général < 5 %), mais dépend du couple résistant... Voir courbe de couple)

- D'où le nom de moteur « **asynchrone** ».... !

lien
vidéo
asynchrone

*Exo à faire : donner vitesse de rotation
rotor; 1 paire pôle + fréquence tension alim*



Exercice 3: Glissement et vitesse de synchronisme

1) Un moteur asynchrone (à une seule paire de pôles au stator et au rotor) est alimenté à une fréquence de 100 Hz. On se place en régime permanent : dans ces conditions, le moteur tourne à une vitesse de $5760 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

1-a) Calculer la vitesse de synchronisme dans ces conditions.

1-b) En déduire la valeur du glissement.

2) A $n' = 12\,000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, le même moteur commence à perdre de la puissance. Des mesures ont pu déterminer que le glissement, mesurer en régime permanent dans ces conditions, était de 11 %. Calculer la fréquence f' de la tension avec laquelle le moteur est alimenté pour fonctionner dans ces conditions.

ANA ?

Utiliser la page suivante pour répondre !

1-a) « $p=1$ » $\rightarrow n_s = f = 100 \text{ tr/s} = 6\,000 \text{ tr/min}$

1-b) $g = (6000 - 5760)/6000 = 4 \%$

2) $g' = 11 \%$ $\rightarrow n_s = n / (1-g) = 12000 / 0,89 = 13\,483 \text{ tr/min} = 224,7 \text{ tr/s}$

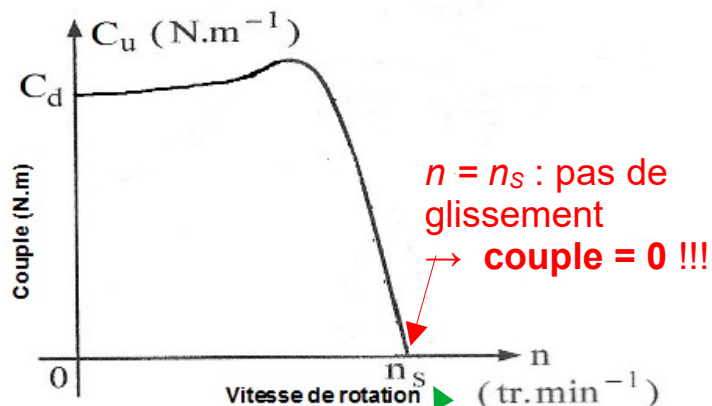
$\rightarrow f' \approx 225 \text{ Hz}$

Si ça passe, faire un 3) ou changer ?

Moteurs asynchrones (MAS)

Caractéristique mécanique

Courbe de couple pour des conditions d'alimentation fixes (fréquence, valeur efficace et forme d'onde de la tension d'alimentation ne changent pas)



C_u : couple utile
 C_d : couple au démarrage
 n_s : vitesse de synchronisme
 ($n = n_s$: pas de glissement)

Pour un VE, on adapte n_s (via f_{alim}) au fur et à mesure que le rotor prend de la vitesse → **Couple constant** (tant qu'on arrive à maintenir le courant constant....)

Courbes maximales pour un moteur de V.E. piloté (voir partie « commande en régime d'un MS ou d'un MAS »).

Courants au stator ≈ 1000 A !

Tesla Model S

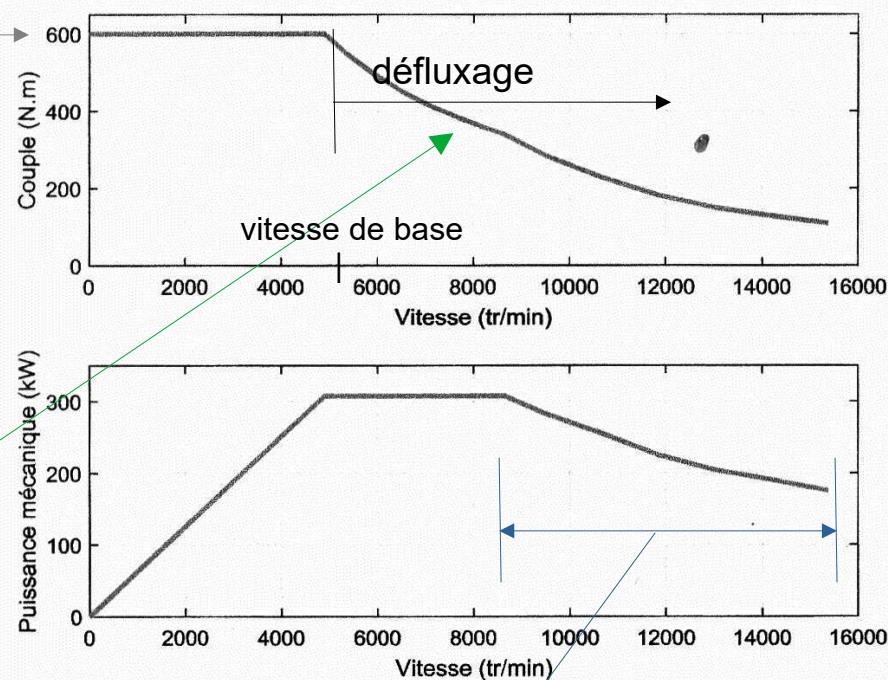


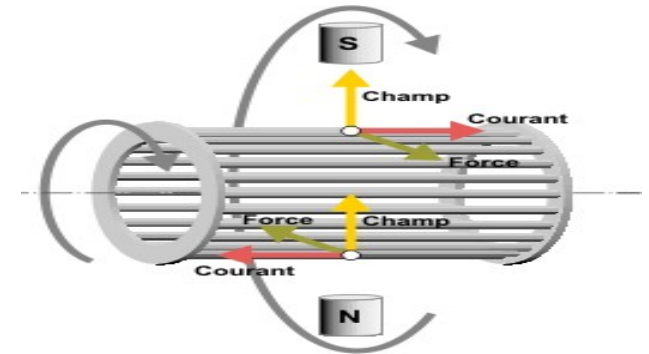
Figure 2.15 – Courbes enveloppes de couple et de puissance mécanique du moteur à induction de la Tesla Model S [26]

perte de puissance : courant statorique diminue
 ⇐ de + en + de glissement, rotor n'arrive plus à accélérer

Réa
com
st
+ 2
mis
vilo
Jef
eff
neu

Moteur asynchrone : réversibilité

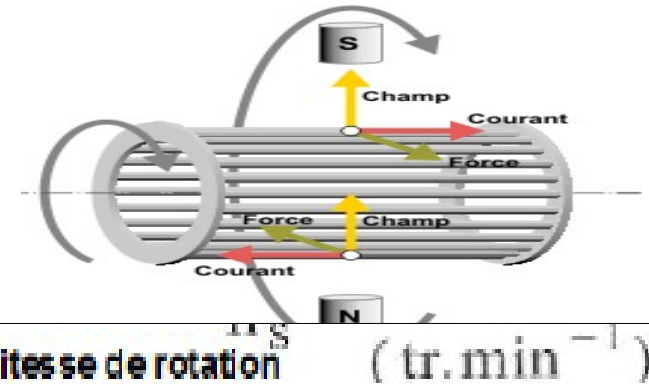
Si on fait tourner le champs magnétique inducteur moins vite que le rotor :



- Le rotor subit un couple tendant à le faire ralentir.
- Celui-ci perd donc de l'énergie cinétique
- Transformée en énergie électrique dans les bobinages du stator (flux du champs magnétique crée par courants rotor → bobines stator)
- Énergie mécanique → Énergie électrique :
Fonctionnement en génératrice PENDANT CETTE PHASE
(recharge des batteries)
- Moteur asynchrone : machine réversible (mais fonctionnement en génératrice « pure » impossible : on ne peut pas faire un alternateur avec une machine asynchrone !)

Moteur asynchrone : réversibilité

Si on fait tourner le champs magnétique inducteur moins vite que le rotor :



Réversibilité (fonctionnement en génératrice) :

On commande le moteur de telle sorte que le champs tournant tourne que le rotor
 → Le rotor est freiné, l'énergie cinétique perdue par le rotor est convertie en énergie électrique dans les bobinages du stator : la machine fonctionne en (V.E¹ : recharge des batteries)

_(recharge des batteries)

- Moteur asynchrone : machine réversible (mais fonctionnement en génératrice « pure » impossible : on ne peut **pas faire un alternateur** avec une machine asynchrone !)

Moteur synchrone OU asynchrone

Commande en régime (V.E.)

- On peut jouer sur **3 paramètres** de l'alimentation (paramètres **asservis** pour contrôler d'autres paramètres ayant influence + directe sur fonctionnement machines) :
 - **Principal = fréquence** (de la tension d'alimentation)
→ **vitesse de synchronisme** (vitesse rotation champs statorique)
 - **Amplitude** (= valeur maxi → valeur efficace)
 - **Forme d'onde** (cf chap suivant : décalage de commutation, // R.C.)
 - **MSRB** : + 4^{ème} param = $I_{\text{bobinage rotor}}$
(intensité du **courant continu** alimentant le **bobinage du rotor**)
- Moteurs de VE **pilotés en couple**, càd position pédale définit le couple moteur requis
- « **Commande à rendement maximal** » : si plusieurs valeurs des paramètres donnent même couple et vitesse de rotation → on choisit celles qui donnent le **meilleur rendement**

Moteur synchrone OU asynchrone

Commande en régime (V.E.)

- Moteurs de VE **pilotés en couple**, càd position pédale définit le couple moteur requis
- « **Commande à rendement maximal** » : si plusieurs valeurs des paramètres donnent même couple et vitesse de rotation → on choisit celles qui donnent le **meilleur rendement**

Exemple BMW i3 (MSAP)

