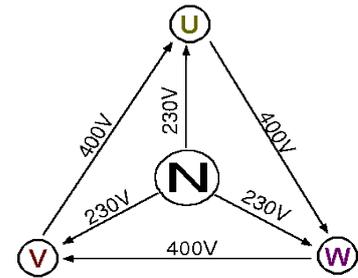
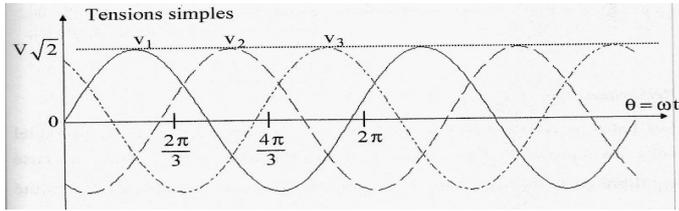


IV) MACHINES À COURANT ALTERNATIF

IV.1) Courant alternatif triphasé

- Un réseau triphasé est composé de **trois tensions alternatives monophasées** (tensions alternatives « classiques ») déphasées entre elles d'un tiers de période (déphasage de $2\pi/3$ rad = 120°)

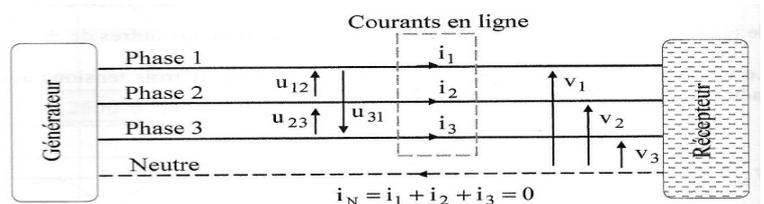


Bornes d'une prise triphasée EDF et valeurs efficaces des tensions entre bornes

- La **valeur efficace** de la tension **entre deux phases** (tensions u_{12} , u_{23} et u_{31} sur le schéma ci-dessous) est **$\sqrt{2}$ fois plus élevée** que la valeur efficace de la tension monophasée correspondante (« tensions simples » : sinusoïdales, voir figure ci-dessus) :

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{2} \times V_1 = \sqrt{2} \times V_2 = \sqrt{2} \times V_3$$

Exemple pour la tension triphasée du réseau EDF : $\sqrt{2} \times 230 \text{ V} = 400 \text{ V}$



Notations adoptées pour un réseau triphasé (réseau équilibré $\leftarrow i_N = 0$)

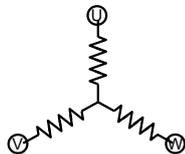
- En triphasé, la **puissance électrique P** absorbée ou délivrée s'exprime (en W) de la manière suivante :

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

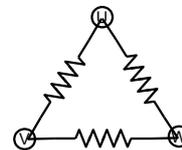
- Où :
- U désigne la valeur efficace de la **tension ENTRE PHASES** ;
 - I désigne la valeur efficace du **courant EN LIGNE** ;
 - φ désigne le déphasage entre courants et tensions (ils n'atteignent pas leur maximum en même temps, raison pour laquelle la puissance en alternatif monophasée est souvent inférieure au produit $U \times I$),
 → le terme « **cos(φ)** » est appelé

- En triphasé, il existe deux manières de raccorder un récepteur au générateur :

Branchement **en**



Branchement **en**



Les moteurs de traction des véhicules électriques et hybrides sont en principe **branchés en triangle**, afin de minimiser les pertes par effet Joule. En effet, à puissance égale, le courant est moindre dans un branchement en triangle.

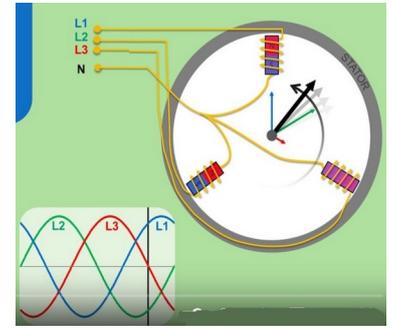
- Utilisation d'une tension triphasée pour obtenir un **CHAMPS MAGNÉTIQUE TOURNANT** : voir vidéo accessible par le QR-code ci-contre.



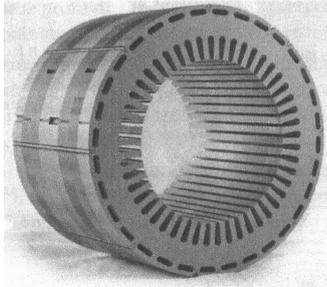
IV.2) Principe de base des machines à courant alternatif

Interaction entre un (voir partie précédente) et :

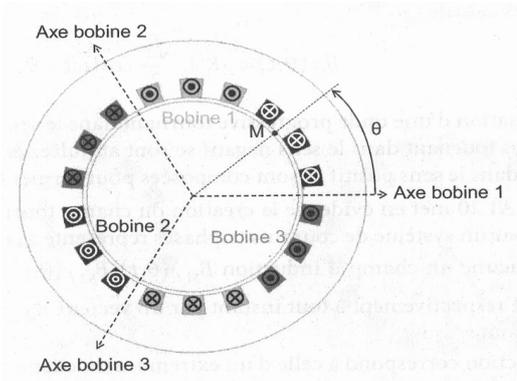
- Un **aimant** (électroaimant ou aimant permanent)
→ Machine
- Un **circuit fermé sans source de tension** (« cage d'écureuil »)
→ Machine



Principe d'obtention d'un champs tournant



Rotor typique d'un moteur synchrone ou asynchrone de V.E. (rotor « à encoches », sans son bobinages)

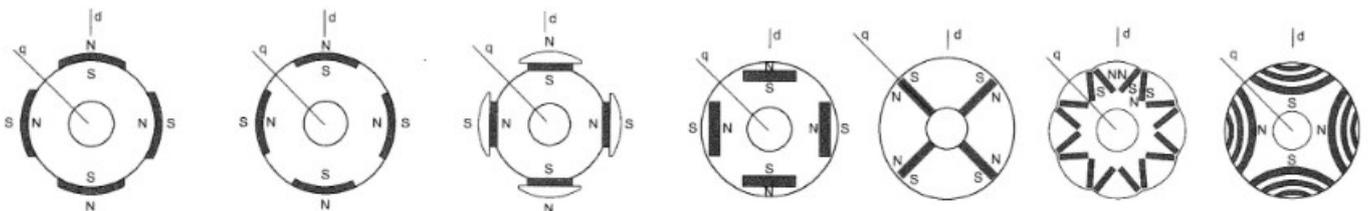
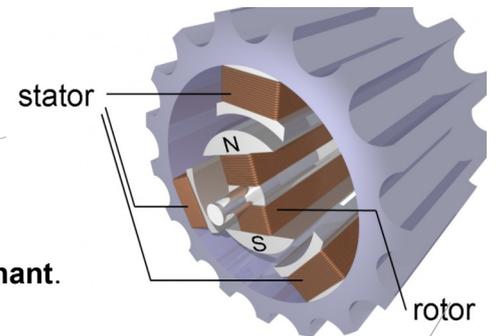


Enroulement des bobinages triphasés

IV.3) Les machines synchrones

a) Constitution et applications aux V.E.¹ : moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)

- « **Circuit d'induit** » sur le
 - Composé de bobines alimentées en
 - C'est ce circuit qui crée le **champs magnétique tournant**.
- « **Circuit inducteur** » sur le
 - constitué d'.....
 - matériau utilisé pour les aimants : alliage Néodyme-Fer-Bore ($Nd_2Fe_{14}B$)
 - Ces aimants peuvent avoir un seul pôle nord et un seul pôle sud, mais en pratique on utilise le plus souvent des aimants à plusieurs paires de pôles (voir illustration ci-dessous)



Différentes typologies d'aimants à plusieurs paires de pôles utilisés pour les rotors de machines synchrones

- Les MSAP représentent **93 % des moteurs de traction de véhicules électriques ou hybrides**. On peut citer par exemple : la Nissan Leaf, la Toyota Prius, la BMW i3, la Tesla Model 3, etc....

¹ V.E. : véhicule électrique

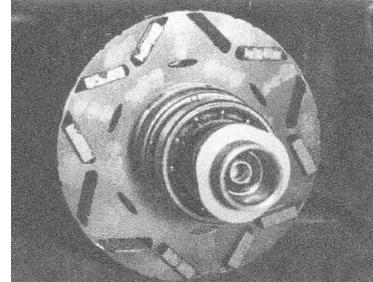
- cas où on a **plusieurs paires de pôles** au rotor ou au stator :

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

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). Les 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 ?



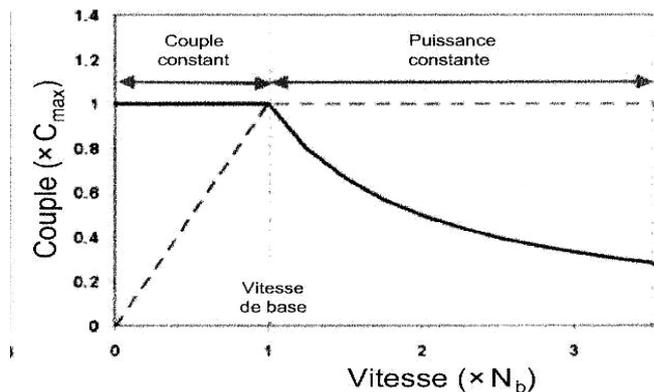
c) Caractéristiques mécaniques

Les moteurs de V.E. sont « **pilotés en couple** », c'est à dire que la position de la pédale d'accélérateur détermine le couple moteur requis.

De plus, d'après ce qui a été dit précédemment (vitesse de synchronisme, $n = f$), pour obtenir une **vitesse de rotation du moteur donnée**, la commande doit adapter la valeur f de la **fréquence** de la tension d'alimentation.

NB : Sauf indication contraire, les courbes de couple/puissance présentées ci-après sont dites « courbes maximales », ou « caractéristiques maximales » : elles correspondent au couple et à la puissance développées par le moteur lors d'une sollicitation maximale (// courbe de couple des moteurs thermiques, toujours obtenues obtenues papillon des gaz ouvert à 100%)

Les **courbes de couple/puissance** des moteurs synchrones ont toujours l'allure suivante :



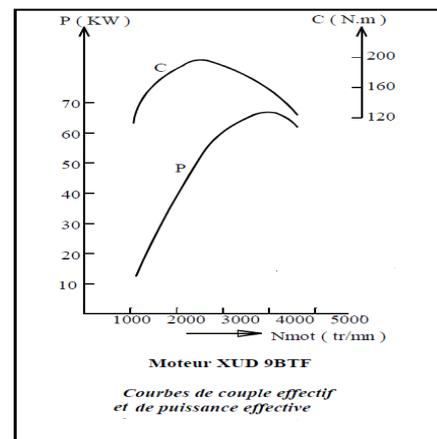
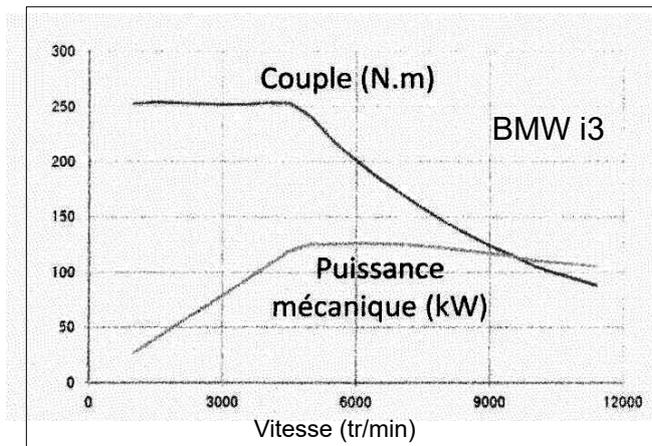
- Le **couple maximum est disponible dès le démarrage** ($0 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$) (comme pour les moteurs à courant continu) ;
- **Ce couple peut être maintenu à une valeur constante** jusqu'à une certaine vitesse de rotation, appelée « »
 - Dans cette zone de régime, l'angle d'auto-pilotage (ψ , voir page précédente) est nul et le reste de $0 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ jusqu'à la vitesse de base. Pour un rotor à une seule paire de pôles, ceci correspond à **un angle ξ entre l'axe nord-sud du rotor de 90° par rapport au champs tournant** créé par le stator. En effet, c'est dans cette configuration que le couple exercé par un champs magnétique sur un aimant est maximum ;
 - La **valeur efficace I_s des courants statoriques** est elle aussi **maintenu constante** (\rightarrow intensité du champs statorique constant). Ceci est réalisé en augmentant la valeur efficace U de la tension d'alimentation des bobinages du stator au fur et à mesure qu'on augmente la fréquence de la tension d'alimentation². ;
 - Le couple étant constant, la puissance augmente linéairement par rapport à la vitesse de rotation ($P = C \times \omega$) dans cette zone. C'est à la vitesse de base que le moteur développe sa puissance maximale.
- **A partir de la vitesse de base**, on ne peut plus augmenter la valeur efficace U de la tension d'alimentation : on est à la **tension maximale que peut fournir la batterie** : on entre dans la **zone de**
 - Dans cette zone de la courbe, on ne peut plus maintenir l'angle d'auto-pilotage constant : il augmente avec la vitesse, **donc le couple diminue** ;
 - Malgré l'inductance des bobinages, **l'intensité I_s des courants statoriques reste elle constante**, car la force contre électromotrice (f.c.é.m.) créée par les aimants du stator dans les bobinages diminue (défluxage) ;

2: voir TP du chap 8 : en régime alternatif, plus la fréquence est élevée, plus l'inductance d'une bobine a pour effet de diminuer l'amplitude du courant quand la fréquence augmente, pour une même amplitude de la tension alimentant la bobine.

- La puissance développée par le moteur reste constante, à sa valeur maximale, dans cette zone : en effet, U et I_s sont constants, le facteur de puissance évolue peu, donc la puissance absorbée est constante : le rendement pro **la puissance mécanique développée reste à la même valeur** che de 100 % fait donc que.

Exemple :

Courbes maximales du moteur de la BMW i3 (MSAP) vs moteur thermique XUD9BTF de Citroën



d) Réversibilité

On considère maintenant le cas où le rotor est **en avance** sur le champs statorique (champs tournant). Dans ce cas, le couple exercé sur le rotor est dans le sens inverse à la rotation : on a un **couple de freinage**. Le flux du champs magnétique créé par le rotor dans les bobinages du stator induit alors une tension supérieure à la tension d'alimentation : c'est une force électromotrice et non plus une force contre électromotrice. **L'énergie mécanique perdue est transformée en énergie électrique** (récupérée par le stator).

- Dans un V.E., ceci arrive dès qu'on relâche la pédale d'accélérateur : la commande fait que le champs statorique tourne moins vite, créant un retard de ce champs par rapport au rotor (le rotor est donc en avance). On a à la fois un « freinage moteur » et une récupération d'énergie qui permet de recharger la batterie haute-tension dans cette phase.
- Les MSAP sont donc des machines **complètement réversibles** : même si le stator n'est **pas alimenté**, et que le rotor tourne, la fém induite dans les bobinages induit une tension aux bornes de ces bobinages : on obtient un **générateur de courant alternatif** ; (fonctionnement de la machine en génératrice)

**TOUS LES (de véhicule, de centrale électrique, etc....)
SONT DES MACHINES SYNCHRONES, fonctionnant en GÉNÉRATRICE**

e) Variante aux MSAP : les moteurs synchrones à rotor bobiné (MSRB)

A la place d'aimants permanents au rotor, on peut obtenir exactement les mêmes effet en utilisant des **électro-aimants**, c'est à dire des bobines alimentées en **courant continu**.

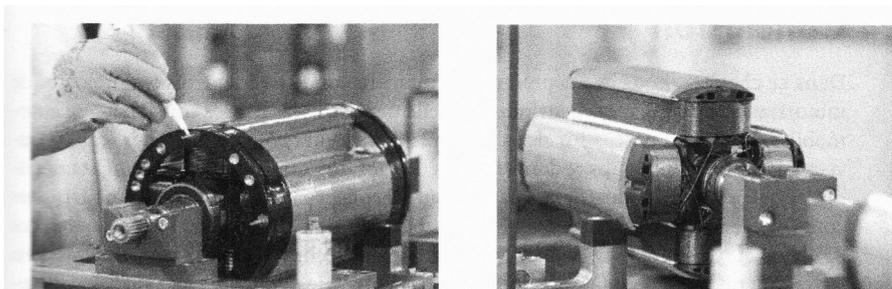
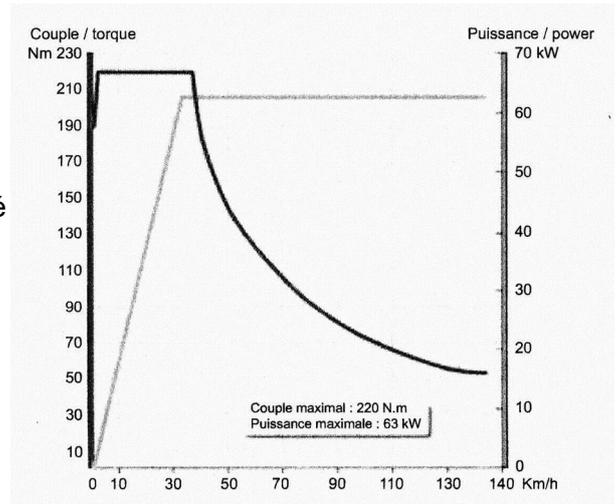


Figure 2.28 – Rotor bobiné 4 pôles du moteur Renault 5A Gen3 (R240) [37bis]

- Le principal avantage est que ces moteurs ne nécessitent **PAS DE TERRES RARES** ;
- De plus, on dispose ainsi d'un **paramètre de plus pour piloter le moteur** : l'intensité du courant d'alimentation de ces bobinages (rotor). Pour un point de fonctionnement donné du moteur, on peut alors choisir le jeu de paramètres qui optimise le rendement global ;
- En terme de caractéristiques mécaniques, un MSRB possède une zone de défluxage plus large qu'un MSAP (voir caractéristique maximale du moteur 5A Gen2 de la Renault Zoé ci-contre) ;
- En revanche, avoir à alimenter des bobines en rotation implique l'utilisation d'un **système balais-collecteurs**, ce qui peut provoquer de **l'usure** par frottements et une **fabrication plus coûteuse** du moteur qu'un MSAP
- Autre inconvénient, les **pertes par effet Joule** dans ces bobinages tournants sont plus **difficiles à évacuer** que dans des bobinages fixes.



caractéristique maximale du moteur 5A Gen2 équipant les Renault Zoé avant 2015 (moteur Continental)

A l'heure actuelle, peu de constructeurs de V.E. ont fait le choix du MSRB. on peut citer :

- Toutes les Renault électriques construites depuis 2002 (Kangoo ZE, Fluence ZE, ZOE, ...).
- Jusqu'en 2015, la fabrication de ces moteurs était sous-traitée par Continental (moteurs 5A Gen1 et Gen2), mais désormais Renault fabrique ses propres moteurs (5A Gen3) ;
- Le SUV iX3 de BMW utilise également un rotor bobiné ;
- En dehors du domaine automobile, Les locomotives fabriquées par Alstom pour les TGV Atlantique et Sud-Est sont équipées de MSRB.

IV.4) Les machines asynchrones (MAS) (Nikola Tesla, ≈1885)

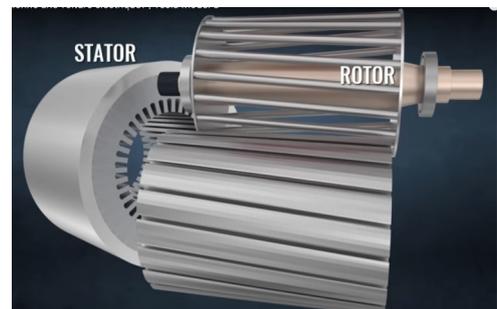
On les appelle aussi : « **moteurs à induction** »

a) Constitution d'une MAS

- Sur le **STATOR** : **circuit inducteur**. Ce sont des bobines alimentées en qui créent le champs magnétique tournant.

→ **Même stator que pour un moteur synchrone !!!**

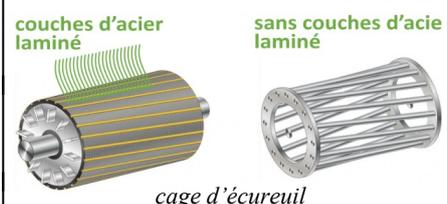
- Sur le **ROTOR** : **circuit d'induit** : on l'appelle « .. », il s'agit conducteurs (en ou en), fermés sur eux-mêmes et **non alimentés**. Ces barres conductrices sont encapsulée dans du matériau ferromagnétique feuilleté.



Moteur asynchrone typique en vue éclatée (source : vidéo Tesla)

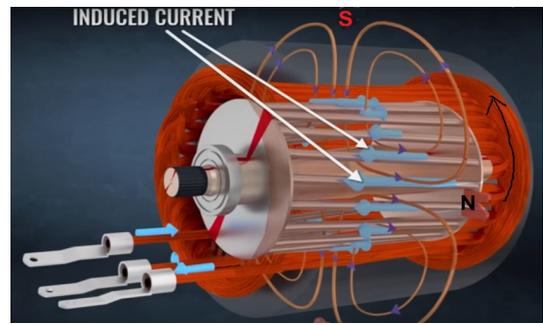
Contrairement aux machines synchrones, **le rotor est donc passif !**

MAIS, en fonctionnement, du courant circule néanmoins dans le rotor :



(Courants induits : voir I-3) p 2)

L'encapsulation de la cage d'écuriel dans de l'acier laminé (ou autre matériau ferro-magnétique) renforce ce phénomène d'induction, qui serait trop faible dans des barres en aluminium ou en cuivre seules.



Exemples de véhicules équipés d'un MAS :

- 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 : TGV Duplex 2^{ème} génération, Eurostar (les TGV plus récents, nommés AGV - 2012- sont équipés de MSAP)
-



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

De plus, sur certains véhicules électriques ou hybrides à quatre roues motrices (Tesla Model 3 « Dual Motor », Toyota Prius 4^{ème} génération en version 4WD), la tendance actuelle est de coupler un MS sur un essieu et un MAS sur l'autre, afin de profiter des avantages de l'un ou de l'autre selon les conditions de roulage.

b) Avantages et inconvénients d'un MAS

Au vu de ses caractéristiques, le choix d'un moteur synchrone est particulièrement pertinent pour des **véhicules nécessitant une forte puissance et une vitesse maximum élevée.**

Avantages

- Pas d'aimants permanents → n'utilise **pas de terres rares** ;
- Conception simple et éprouvée → **coût faible** ;
- **Vitesse de rotation maximum supérieure** à celle d'un moteur synchrone de puissance comparable ;
- **Puissance plus élevée** qu'un moteur synchrone pour deux moteurs de même masse ;
- Robustesse vis à vis d'une défaillance du convertisseur de puissance.

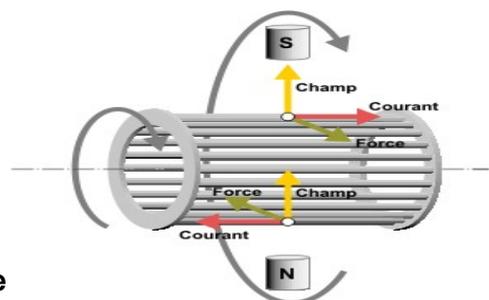
Inconvénients

- **rendement maximum plus faible** qu'un MSAP ;
- Du courant circule dans le **rotor** : cela crée des **pertes Joules qui sont difficiles à évacuer**, comme on l'a vu pour le MSRB ;
- Si la puissance maximale que le moteur peut développer est supérieure à celle d'un moteur synchrone, la **plage de vitesse** dans laquelle cette **puissance maximum** est disponible est **plus restreinte** (voir plus loin).

c) Mécanisme de création du couple et glissement

• L'interaction entre les courants induits dans le rotor (courants de Foucault) et le champs magnétique **créé une** sur chaque barre conductrice. Il résulte de ces forces un couple mécanique permettant la rotation du rotor.

→ **La rotor part « à la poursuite » du champs tournant (champs statorique), mais ne le rattrape jamais !**



En effet, si le rotor parvenait à la même vitesse de rotation que le champs statorique, il verrait
..... :

- Il n'y aurait alors **plus de courants induits**
- Donc **plus de force de Laplace**
- Et donc le **couple deviendrait nul** ⇒ le rotor ralentirait jusqu'à voire réapparaître un champs magnétique variable (tournant dans le référentiel du rotor).

→ **Un équilibre s'établit donc** (couple moteur créé = couple résistant) **quand le rotor tourne à une vitesse légèrement à celle du champs magnétique ;**

• Vocabulaire (à retenir) :

- **Le phénomène décrit ci-dessus est appelé**
- **La vitesse de rotation du champs magnétique (dans le référentiel fixe) est appelée vitesse de**

• Définition :

Le **glissement (noté g)** est la différence de vitesse de rotation entre le champs statorique (vitesse de synchronisme, notée n_s) et la vitesse de rotation du rotor (vitesse notée n) :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

- **En régime permanent** (vitesse de rotation fixe : couple moteur = couple résistant d'après la 2^{ème} loi de Newton), le glissement a une **valeur faible** (en général < 5%), du moins dans des régimes « modérés » du moteur (pour un V.E.)
- C'est à ce phénomène de glissement que ce type de moteur doit son nom de moteur « asynchrone » : le mouvement du rotor et celui du champs statorique ne sont pas synchronisés, contrairement aux machines « synchrones ».

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 tr·min⁻¹.

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

1-b) En déduire la valeur du glissement.

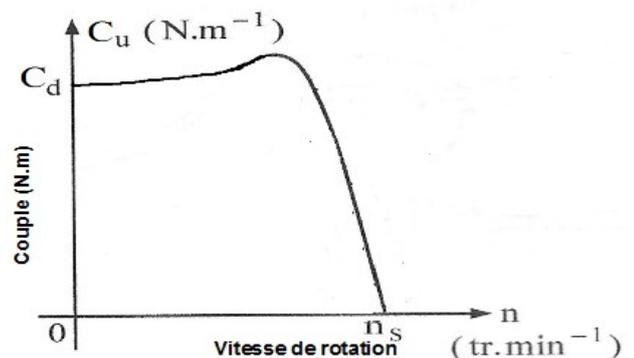
2) A $n' = 12\,000$ tr·min⁻¹, le même moteur commence à perdre de la puissance. Des mesures ont pu déterminer que le glissement, mesurer en régime permanent dans ces conditions, était de 11 %. Calculer la fréquence f' de la tension avec laquelle le moteur est alimenté pour fonctionner dans ces conditions.

Utiliser la page suivante pour répondre !

d) Caractéristiques mécaniques d'un MAS

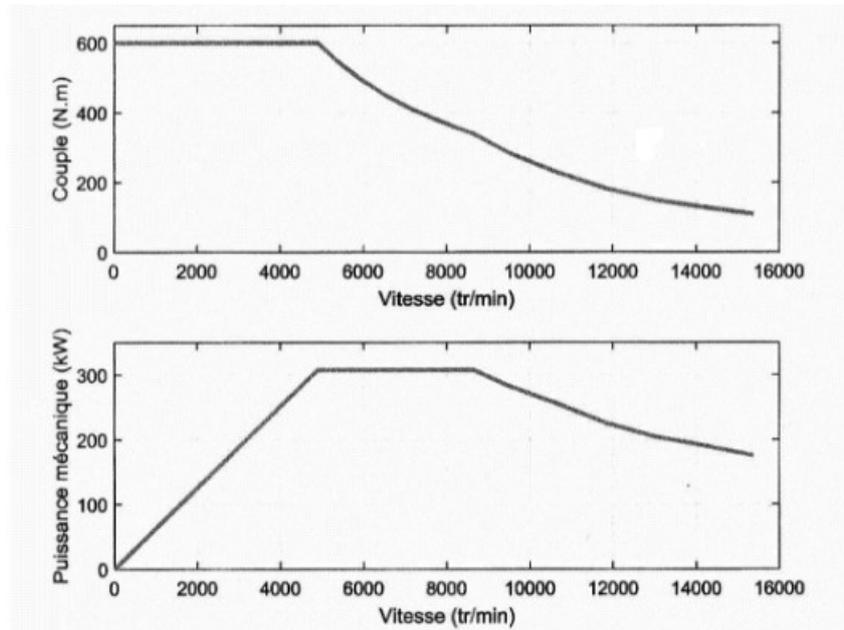
• Si on n'adapte pas la tension d'alimentation à la vitesse de rotation (même approche que dans le TP « Moteur à courant continu » : fréquence, valeur efficace et forme d'onde de la tension d'alimentation fixes), on obtient une courbe de couple qui l'allure de la courbe ci-contre :

- Couple substantiel dès le démarrage du moteur ;
- C'est à une **vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme n_s** que le **couple est maximum** : cette zone correspond à un glissement de quelques %. C'est cette zone de la caractéristique qu'on va chercher à exploiter pour la motorisation d'un V.E, en pilotant le moteur pour qu'il fonctionne tout le temps dans cette zone.
- Quand le moteur tourne à la **vitesse de synchronisme ($n = n_s$)**, le couple s'annule puisqu'il n'y a **plus de glissement** ! • **Les moteurs asynchrones équipant les V.E. sont donc pilotés** (on adapte en temps réel les paramètres de la tension d'alimentation) **de sorte à rester dans la zone de la caractéristique où le glissement donne les performances optimales.**



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

Courbe maximale du moteur de la Tesla Model S :

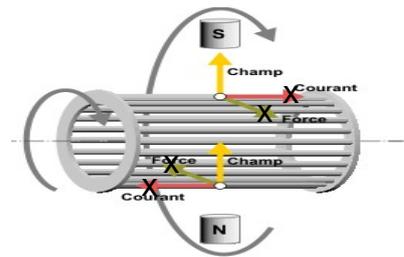


e) Réversibilité d'une MAS

- Pour inverser le sens du transfert d'énergie, on commande le moteur de telle sorte que **le champs statorique tourne** **que le rotor.**

(en pratique : on diminue n_s jusqu'à avoir $n > n_s$)

→ 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 (pour un V.E. : recharge des batteries au freinage)



- **Les machines asynchrones (MAS) sont donc bien, elles aussi, réversibles.**

Cependant, contrairement à une MSAP, le **fonctionnement en « génératrice pure » est impossible** : si le stator n'est pas alimenté, il ne peut pas y avoir de courants induits dans la cage d'écureuil (rotor), et même si on fait tourner le rotor en lui fournissant de l'énergie mécanique, celui-ci n'induit aucun flux dans les bobinages du stator, ne produisant donc aucune énergie électrique.

IV.5) Commande en régime d'un moteur SYNCHRONES OU ASYNCHRONES

• Grâce à des **capteurs de position/vitesse rotor** et la mesure des **courants d'alimentation**, les moteurs de traction de V.E. sont asservi. En fonction de la sollicitation demandée (pédale d'accélérateur) et des informations issues de ces capteurs, un **calculateur adapte les paramètres de la tension d'alimentation** du moteur. (// ECU pour un moteur thermique). C'est le rôle de l'« unité de contrôle de puissance » (voir chap 8). Ces paramètres sont au nombre de trois (quatre pour un MSRB) :

- le principal paramètre de contrôle du moteur est la **fréquence de la tension d'alimentation** des bobinages du stator. En effet, on a vu que c'est elle qui impose directement la **vitesse de synchronisme** du moteur (vitesse de rotation du champs statorique, qu'il s'agisse d'un MS ou d'un MAS)
- En dessous de la vitesse de base, **l'amplitude** de cette tension est également adaptée (au dessus de la vitesse de base, on a vu qu'elle était au maximum permis par la batterie)³.
- Afin de garder un courant statorique constant (en valeur efficace : I_s) sur toute la plage de vitesse, quelles que soient la fréquence et l'amplitude de la tension, on peut jouer aussi sur la **forme d'onde** de la tension⁴.
- Pour les moteurs à rotor bobiné (MSRB) on dispose d'un 4^{ème} paramètre : **l'intensité du courant (continu!) qui alimente le(s) bobinage(s) du STATOR** (électro-aimant).

• Stratégie de commande d'un moteur de V.E. :

Les moteurs de V.E. sont **pilotés en couple** : la position de la pédale d'accélérateur détermine le couple moteur requis (d'où le choix de maintenir I_s constant pour une position de la pédale donnée : l'intensité du champs statorique est directement proportionnel à I_s).

De plus, si plusieurs jeux de valeurs des paramètres de commande permettent d'obtenir le même couple et la même vitesse, le calculateur choisit les valeurs qui optimisent le rendement global : on parle de « **commande à rendement maximal** ».

3 En régime alternatif, l'effet auto-inductif des bobines (inductance L) fait que plus la fréquence est élevée, plus l'amplitude du courant diminue pour une amplitude donnée de la tension. Si on veut garder un courant statorique constant (en valeur efficace), il faut donc augmenter l'amplitude de la tension (→ commande « à U/f constant »)

4 En effet, on verra dans le chap 8 que l'onduleur, qui transforme la tension continue de la batterie en tension alternative, peut fonctionner avec un décalage de commutation, permettant différentes formes d'onde de la tension (// commande MLI ou PWM : on adapte le rapport cyclique d'une tension hachée pour commander un actionneur fonctionnant en courant continu)