

CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE D'ÉNERGIE

OBJECTIFS

- Posséder des connaissances générales sur les convertisseurs électromécaniques (machines tournantes).
- Connaître les propriétés élémentaires des trois types de moteurs (continu, alternatif et pas à pas).
- Savoir quelle grandeur électrique (U, I ou f) agit sur quelle grandeur mécanique (T ou Ω).
- Étudier le couplage d'une machine à sa charge (démarrage et point de fonctionnement).

I- LES CONVERTISSEURS ELECTROMAGNÉTIQUES - GÉNÉRALITÉS

1- Conversion d'énergie

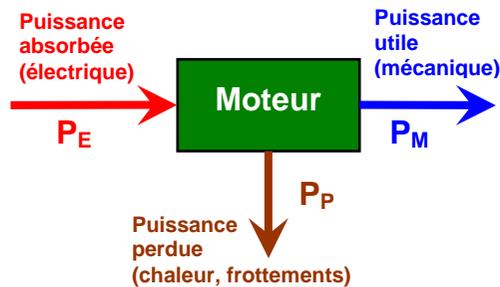
Un convertisseur électromagnétique ou "machine tournante" effectue une transformation entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique.

Deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister :

① Fonctionnement "moteur"

L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique (schéma ci-dessous):

On rappelle qu'en régime continu, l'énergie W est égale à la puissance P multipliée par le temps t ($W = P.t$) avec $1kW.h = 1kW.1h$ ou $1Joule = 1W.1s$

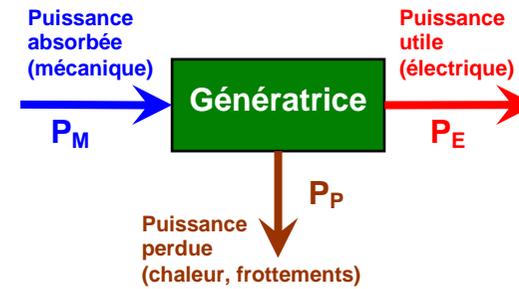


On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{P_M}{P_M + P_P}$$

② Fonctionnement "génératrice"

L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (schéma suivant):



On peut définir le rendement :

$$\eta = \frac{P_E}{P_M} = \frac{P_E}{P_E + P_P}$$

③ Expression des puissances

■ Puissance mécanique :

Le diagramme montre un rectangle contenant l'équation $P_M = T_U \cdot \Omega$. Trois flèches pointent vers ce rectangle : "puissance mécanique (W)" de gauche, "couple utile (N.m)" de haut, et "vitesse rotation (rad.s⁻¹)" de droite.

■ Puissance électrique en régime continu :

Le diagramme montre un rectangle contenant l'équation $P_E = U \cdot I$. Trois flèches pointent vers ce rectangle : "puissance électrique (W)" de gauche, "tension d'alimentation (V)" de haut, et "intensité absorbée (A)" de droite.

■ Puissance électrique en régime alternatif sinusoïdal :

Le diagramme montre un rectangle contenant l'équation $P_E = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$. Trois flèches pointent vers ce rectangle : "puissance électrique (W)" de gauche, "tension efficace d'alimentation (V)" de haut, et "intensité efficace absorbée (A)" de droite. Une quatrième flèche pointe vers le rectangle depuis le bas, étiquetée "déphasage courant-tension (degré ou radian)".

2- Réversibilité des machines électriques tournantes

Les machines électriques tournantes sont réversibles, la même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice (exemples ci-dessous avec trois familles de moteurs).

- ① Le moteur à courant continu:
Une action mécanique sur le rotor produit une tension continue au stator, c'est la **génératrice à courant continu** (dynamo).
- ② Le moteur à courant alternatif:
 - Le moteur synchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation c'est la **génératrice synchrone** (alternateurs des centrales électriques).
 - Le moteur asynchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence légèrement inférieure au cas de la génératrice synchrone c'est la **génératrice asynchrone** (centrales éoliennes).
- ③ Le moteur pas à pas:
Une action mécanique sur un moteur pas à pas va produire une tension alternative à chaque enroulement du stator.
Le moteur pas à pas est lui aussi réversible mais n'est, en principe, pas utilisé en génératrice.

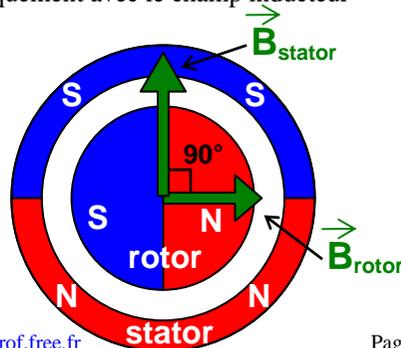
3- Constitution des machines électriques tournantes

- ① Le stator
Le stator est la partie fixe de la machine.
 - Dans le cas d'un moteur, le stator est alimenté en électricité et produit un **champ magnétique inducteur**.
 - Dans le cas d'une génératrice, le stator produit une **tension induite** par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation.
- ② Le rotor
Le rotor est la partie tournante de la machine, les courants rotoriques produisent un champ magnétique (champ induit) qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur (stator) et produit un couple de rotation.

Remarque importante :

Le **couple mécanique est maximum** lorsque le champ inducteur \vec{B}_{stator} est **perpendiculaire** au champ induit \vec{B}_{rotor} .

Le schéma ci-contre illustre cette propriété fondamentale :



II- LES PRINCIPAUX MOTEURS ÉLECTRIQUES

1- Le moteur à courant continu à excitation séparée

① Principe de fonctionnement

Le stator crée un champ magnétique \vec{B}_{stator} fixe (bobinages ou aimants permanents).

Le passage du courant dans les spires du rotor crée un champ magnétique \vec{B}_{rotor} .

L'interaction $\vec{B}_{\text{stator}} \leftrightarrow \vec{B}_{\text{rotor}}$ produit un couple qui induit la rotation du rotor.

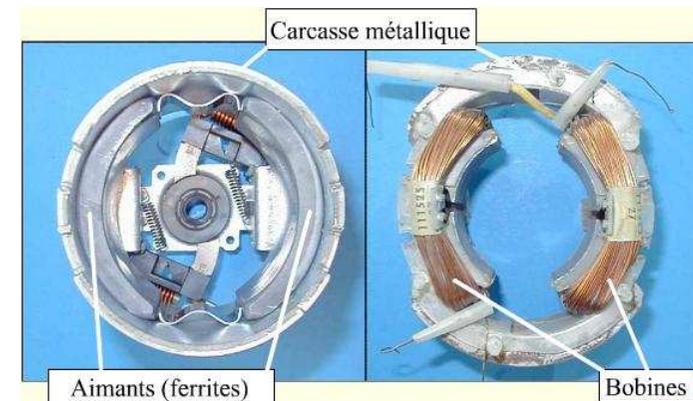
*Le collecteur du rotor tend à **maintenir les champs perpendiculaires**.*

② Constitution

■ Le stator

Pour créer le champ magnétique inducteur, le stator est constitué d'aimants permanents ou de bobinage (électroaimants).

Le schéma ci-dessous illustre les deux types de stator :

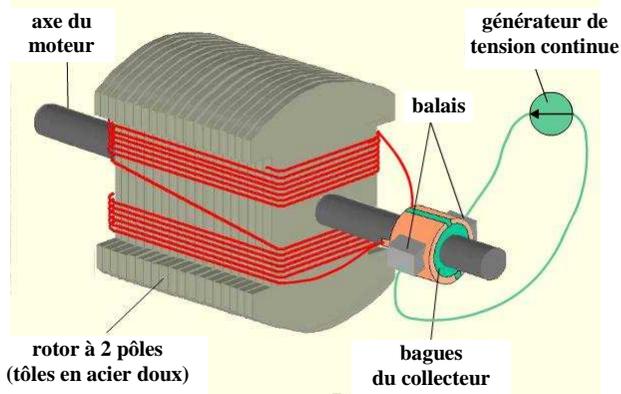


■ Le rotor

Le rotor est constitué de bobines alimentées en courant continu par l'intermédiaire de balais frottant sur le collecteur.

Les bobinages du rotor doivent supporter toute la puissance électrique absorbée par le moteur.

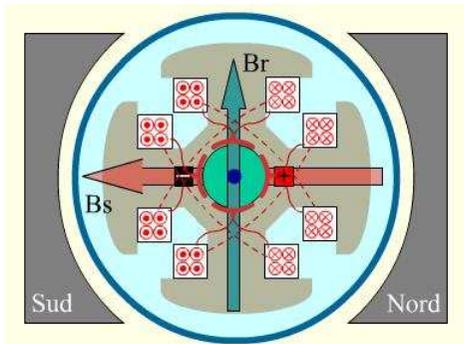
Le schéma ci-dessous montre la liaison électrique entre un rotor à deux pôles et la source de tension continue:



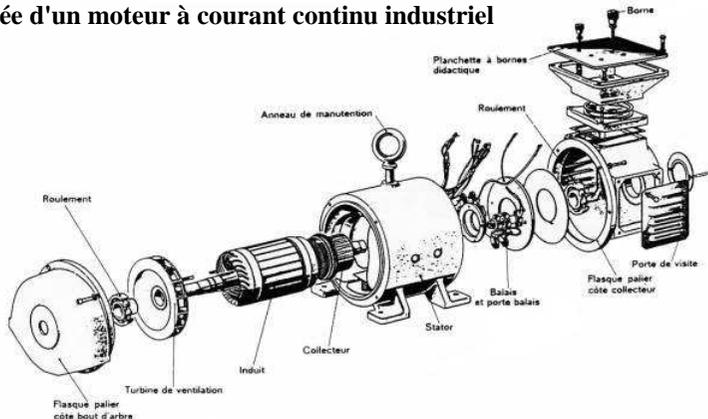
■ Exemple d'un moteur à 4 pôles

Pour obtenir l'orthogonalité entre les deux champs magnétiques (rotor et stator), il faut avoir un nombre important de pôles au rotor.

Le schéma ci-dessous illustre l'interaction $\vec{B}_{\text{stator}} \leftrightarrow \vec{B}_{\text{rotor}}$ pour un moteur à 8 pôles:



■ Vue éclatée d'un moteur à courant continu industriel

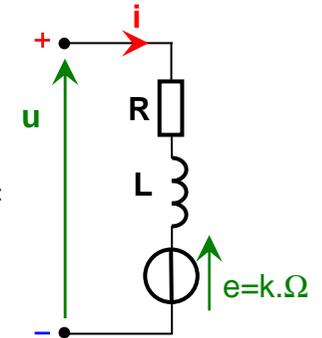


③ Modèle électromécanique équivalent

Le moteur à courant continu à excitation séparée (\vec{B}_{stator} fixe) est accessible électriquement par deux bornes (tension u et courant i).

Le modèle électrique équivalent est représenté ci-contre :

- R est la résistance d'induit (collecteur + rotor)
- L est l'inductance d'induit (enroulements rotor)
- e est le tension due à la rotation du moteur (f.é.m.)



L'équation électrique donne : $u - k\Omega = Ri + L \frac{di}{dt}$

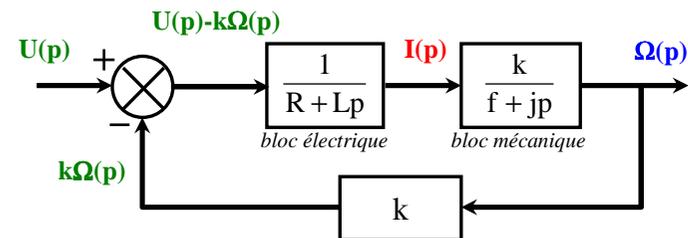
$$\Rightarrow U(p) - k\Omega(p) = (R + Lp)I(p) \Rightarrow \frac{I(p)}{U(p) - k\Omega(p)} = \frac{1}{R + Lp} \text{ (bloc électrique).}$$

L'équation mécanique donne : $ki - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt}$ (f est le coefficient de frottement)

$$\Rightarrow kI(p) = (f + Jp)\Omega(p) \Rightarrow \frac{\Omega(p)}{I(p)} = \frac{k}{f + Jp} \text{ (bloc mécanique).}$$

Le moteur est donc un asservissement à lui seul, ce qui explique que sa vitesse de rotation varie peu suivant la charge qu'il entraîne.

Le schéma ci-dessous représente le moteur à vide comme un asservissement:



Deux propriétés importantes à retenir

- Le tension d'alimentation agit sur la vitesse : $e = k\Omega$.
On règle la vitesse en ajustant la tension d'alimentation.
- Le couple électromagnétique agit sur le courant : $T_{em} = k.i$.
Lorsque le moteur "force", il consomme du courant.

④ Lecture d'une plaque signalétique

Les caractéristiques électriques et mécaniques nominales sont inscrites sur une plaque lisible sur le moteur (exemple ci-dessous):

IEC 34.1 .1990		LEROY SOMER		MADE IN FRANCE	
MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR					
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992 M 249 kg	
Classe / Ins class H		IM 1001		IP 23 IC 06	
M _{nom} / Rated torque 301 N.m		Altit. 1000 m		Temp. 40 °C	
	kW	min ⁻¹	V	A	V A
Norm./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360 3
	3,63	115	44	9,55	360 3
	36,3	1720	440	95,5	240
système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3 ○	

Fonctionnement nominal

En fonctionnement normal (nominal), ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Puissance mécanique : 36,3kW (1150tr/min et 301N.m).
- Alimentation rotor : 440V et 95,5A (soit 42kW).
- Alimentation stator : 360V et 3A (soit 1,08kW).

On peut en déduire le rendement : $\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{36,3}{42 + 1,08} \approx 84\%$.

⑤ Utilisation des moteurs à courant-continu

Du début du 20° siècle et jusque vers les années 1975, le moteur à courant continu était la seule solution pour obtenir des **vitesse variables** (avec inversion possible du sens) et un couple nominal à n'importe quelle vitesse.

L'utilisation industrielle, de ces moteurs présente les **limitations suivantes** :

- vitesse maximum de ≈ 3000 tr/min pour des puissances moyennes (>1kW);
- tension d'alimentation < 1500V (isolation entre les lames);
- puissance maximum inférieure à 1MW;
- entretien régulier (usure des balais et du collecteur);
- impossibilité d'emploi en atmosphère explosive (arcs électriques au collecteur).

Pour ces raisons, on remplace de plus en plus les moteurs à courant continu par des moteurs à courant alternatif alimentés par des convertisseurs électroniques (progrès de l'électronique de puissance).

La machine à courant continu reste néanmoins très utilisée, principalement dans les situations suivantes (faibles et moyennes puissances):

- lorsqu'on ne dispose que d'une tension continue (véhicules, modélisme,...);
- lorsqu'une précision élevée en vitesse est demandée (robot, machine outil,...);
- lorsqu'on veut un couple élevé à l'arrêt.

Le moteur a courant continu reste encore utilisé dans les premiers TGV (TGV Sud-Est avec 12 moteurs à courant continu de 535 kW).

2- Le moteur à courant alternatif synchrone triphasé

① Champ magnétique tournant (stator)

Le principe de fonctionnement du moteur synchrone (mais aussi asynchrone) repose sur la création d'un champ magnétique tournant.

Les bobinages triphasés du stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse Ω_s qui dépend de la pulsation d'alimentation $\omega = 2\pi.f$, mais aussi du nombre de paires de pôles p du stator (relation ci-dessous) :

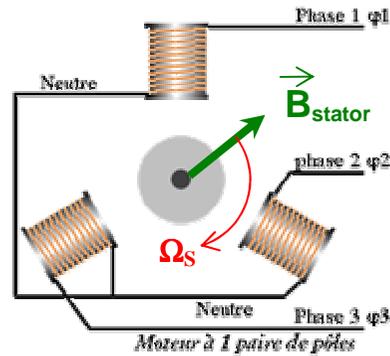
$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Vitesse angulaire du champ tournant (synchronisme) en rad/s

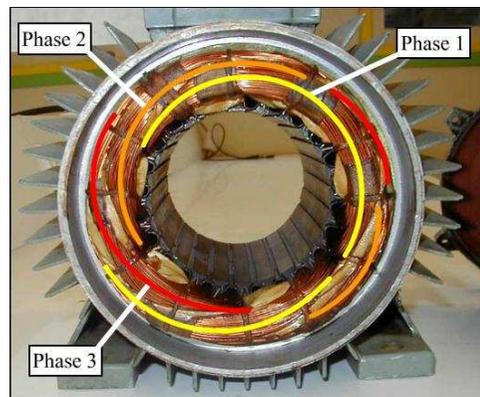
Pulsation d'alimentation ($\omega = 2\pi.f$) en rad/s

Nombre de paires de pôles

Le schéma ci-contre montre le principe de création d'un champ tournant à une paire de pôle (un seul champ : $p=1$)



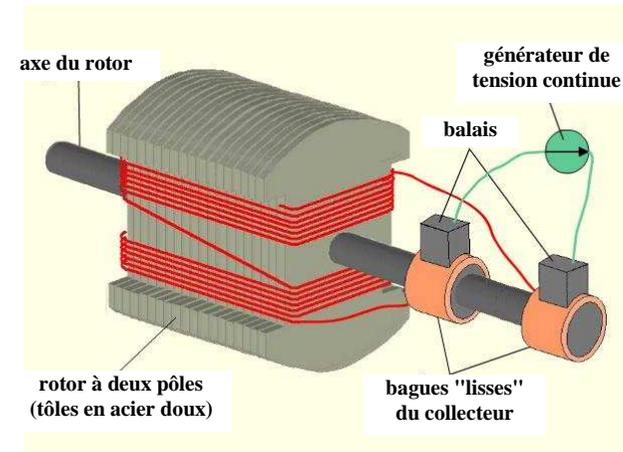
L'image ci-contre représente les bobinages d'un stator de machine synchrone triphasée à 2 pôles ($p = 1$)



② Constitution du rotor

Le rotor produit un champ magnétique fixe par rapport à lui-même.

Il est donc composé d'aimants permanents pour des faibles puissances et d'électroaimants (bobinages) pour des puissances plus élevées (schéma ci-dessous) :



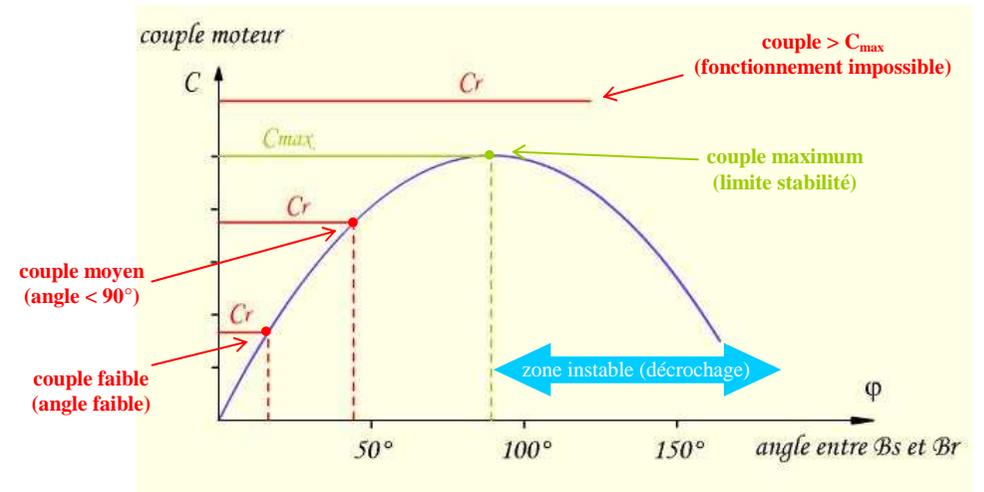
③ Principe de fonctionnement

Le champ rotorique \vec{B}_R "s'accroche" au champ tournant statorique \vec{B}_S .

Le rotor tourne donc à la vitesse Ω_s du champ tournant (synchronisme).

L'angle φ entre \vec{B}_R et \vec{B}_S va donc augmenter avec le couple (valeur limite de 90°).

Le schéma ci-dessous illustre plusieurs modes de fonctionnement.



Une propriété importante à retenir

- La fréquence de la tension d'alimentation agit sur la vitesse : $\Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$.
On règle la vitesse en ajustant la fréquence (onduleur).

④ Lecture de la plaque signalétique d'une machine synchrone



La lecture de la plaque donne les informations suivantes :

- Alimentation rotor : 60V continu (0,3A).
- Nombre de paires de pôles : $p = \frac{f}{n} = \frac{50}{1500/60} = 2$.
- Rendement en moteur : $\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{420}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,75 \times 0,86 + 60 \times 0,3} \approx 90\%$.
- Consommation en courant (réseau 230/400V) : 1,3A en étoile et 0,75A en triangle.

⑤ Utilisations des moteurs synchrones

- Avantages :
La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu.
Son **rendement** est proche de **99%**.
- Inconvénients :
Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.
Il faut une excitation (alimentation du rotor), c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

■ Utilisations :

Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW - compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques.

Il a donc fallu attendre le développement de l'électronique de puissance pour commander des moteurs autosynchrones ou synchrones auto-pilotés (TGV Atlantique – 1981 : 8 moteurs de 1100kW).

Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmeur, servomoteur).

3- Le moteur à courant alternatif asynchrone triphasé

① Champ magnétique tournant (stator)

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone repose sur la création d'un champ magnétique tournant.

Le stator sera donc identique à celui d'un moteur synchrone.

Les bobinages triphasés du stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse Ω_s qui dépend de la pulsation d'alimentation $\omega = 2\pi.f$, mais aussi du nombre de paires de pôles p du stator (relation ci-dessous) :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Vitesse angulaire du champ tournant (synchronisme) en rad/s

Pulsation d'alimentation ($\omega = 2\pi.f$) en rad/s

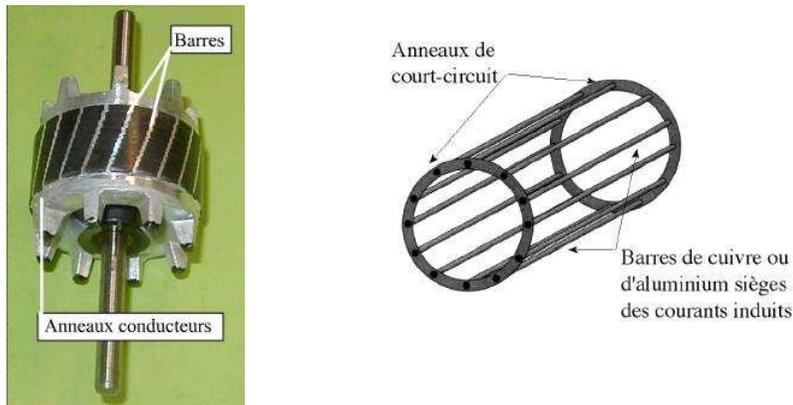
Nombre de paires de pôles

② Constitution du rotor

Le rotor n'est lié à aucune source d'alimentation. Il est constitué de bobinages en court-circuit.

Le rotor le plus utilisé est à "cage d'écureuil", il s'agit de barres de cuivre ou d'aluminium reliées aux extrémités par deux anneaux conducteurs (court-circuit).

Le tout est noyé dans un empilement de tôles (photo et schéma équivalent ci-dessous):



③ Principe de fonctionnement

Le champ tournant statorique \vec{B}_s (vitesse Ω_s) provoque des **courants induits** dans le rotor.

Les **courants induits** du rotor créent un champ rotorique \vec{B}_R qui va interagir avec le champ statorique \vec{B}_s et provoquer la rotation du rotor à une vitesse Ω légèrement inférieure à Ω_s (sinon pas de courant induit).

On peut donc définir le glissement g :

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

Glissement

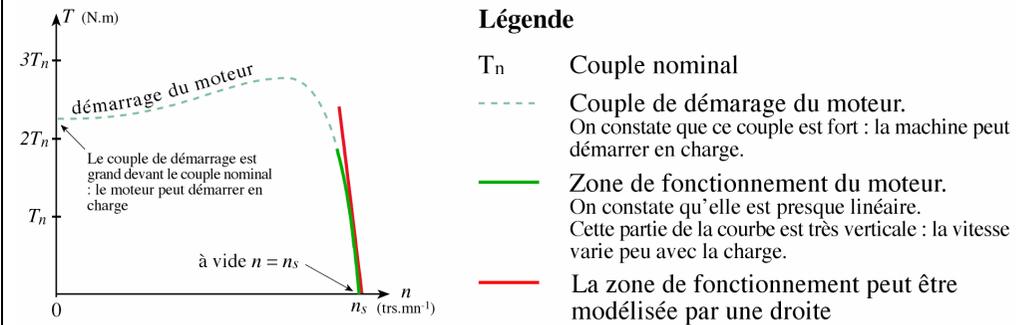
Vitesse de synchronisme en rad/s

Vitesse du rotor en rad/s

Vitesse de synchronisme en tr/min

Vitesse du rotor en tr/min

La couple moteur varie avec la vitesse de rotation suivant le graphe ci-dessous :



Si le glissement est faible (fonctionnement nominal) on peut estimer que le couple est proportionnel au glissement : $T = k.g$

Deux propriétés importantes à retenir

- Le vitesse de rotation est légèrement inférieure à la vitesse

de synchronisme Ω_s :
$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}$$

On règle la vitesse en ajustant la fréquence (onduleur).

On définit le glissement g :
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

- Le couple moteur T_m est proportionnel au glissement g : $T_m = k \cdot g$.
Lorsque le moteur "force", la vitesse diminue légèrement.

④ Lecture de la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

LEROY SOMER MOT. 3 ~ LS 100 L
 N° 8945/79 22 kg
 Code : T

IP 55	I cl. F	40°C	S1	%	c/h
	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A
Δ 380	50	1415	3	0,83	7,1
Δ 400	50	1420	3	0,78	7,2
Δ 415	50	1430	3	0,74	7,3

MADE IN FRANCE DE NDE MOTEURS LEROY-SOMER I.E.C. 34.1 (B7)

La lecture de la plaque pour un réseau 230 / 400V donne les informations suivantes :

- Alimentation rotor : 400V (couplage triangle).
- Vitesse de rotation : $n = 1420 \text{ tr/min} \Rightarrow \text{glissement } g = \frac{1500 - 1420}{1500} \approx 5,3\%$
- Nombre de paires de pôles : $p = \frac{f}{n} = \frac{50}{1500/60} = 2$.
- Rendement en moteur : $\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 400 \times 7,2 \times 0,78} \approx 77\%$.

⑤ Utilisations des moteurs asynchrones

- Avantages :
Le moteur asynchrone est facile à réaliser et très robuste.
Il n'y a pas d'alimentation du rotor donc aucun problème d'usure de collecteur.
Sauf pour des charges élevées, le démarrage est autonome.
- Inconvénients :
La vitesse de rotation n'est pas parfaitement stable.
Le domaine de puissance est limité à 10MW.
- Utilisation

Le moteur asynchrone triphasé, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible.
Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (TGV Eurostar : 12 fois 1020kW).

Remarques : en électroménager (exemple : lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

3- Les moteurs pas à pas

① Généralités

Un moteur pas à pas est une machine tournante dont le rotor se déplace d'un angle élémentaire, α_p , appelé **pas**, lors de chaque commutation du circuit de commande.

La commande de moteur peut se faire en **boucle ouverte** car la position du rotor est connue à tous moments.

On peut définir la **résolution** ou le **nombre de pas par tour** N_p :

$$\text{Résolution} \rightarrow N_p = \frac{360}{\alpha_p} \leftarrow \text{Pas en degré}$$

Les moteurs pas à pas comprennent un stator portant des bobines commutées en courant par une électronique de commande. Par contre, il existe trois technologies pour le rotor ce qui donne trois familles de moteur :

- moteur à aimant permanent;
- moteur à réluctance variable;
- moteur hybride.

L'alimentation des bobines peut se faire soit avec une tension unique soit avec deux tensions symétriques :

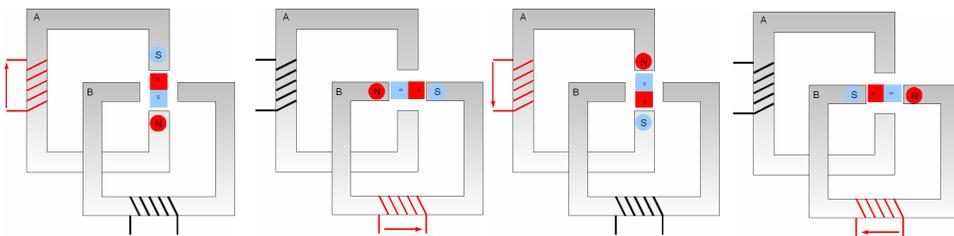
- moteur unipolaire (bobines à point milieu, une seule tension);
- moteur bipolaire (pas de point milieu donc deux tensions symétriques).

② Le moteur pas à pas à aimant permanent

Le rotor est à aimant permanent (ferrite à champ coercitif élevé) et s'aligne sur le champ magnétique créé par les bobines du stator.

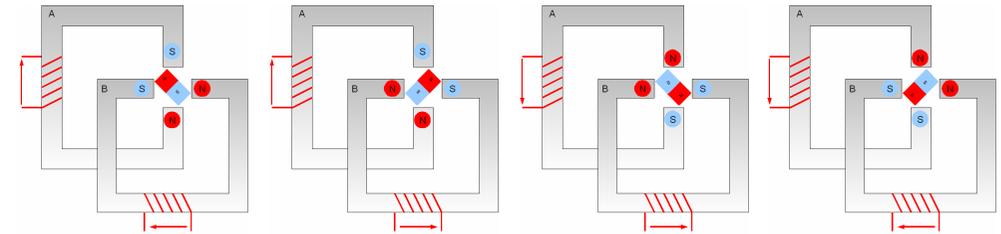
■ Fonctionnement en pas complets

Une seule phase est alimentée à chaque pas (schéma ci-dessous) :



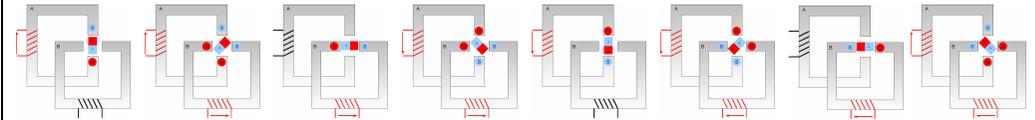
■ Fonctionnement en pas complets avec couple maximal

Les deux phases sont alimentées à chaque pas, le couple est plus important (champ magnétique multiplié par $\sqrt{2}$)



■ Fonctionnement en demi-pas

C'est un mélange de pas entiers et de demi-pas, la résolution est doublée mais le couple n'est pas uniforme.



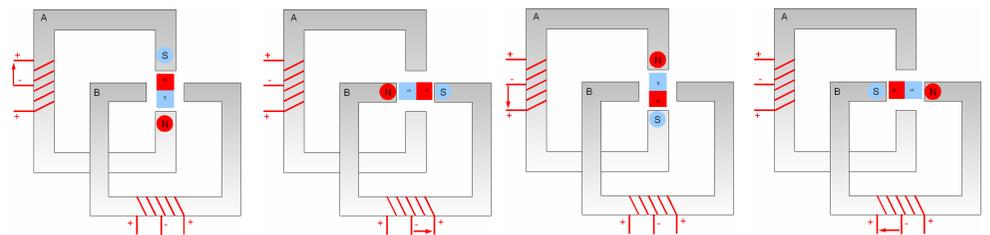
■ Alimentation unipolaire

Dans les exemples précédents, on a vu que l'on doit alimenter les enroulements dans les deux sens de courants, il existe des versions avec des demi-bobines (avec un point milieu).

L'avantage est que l'on n'inverse jamais le sens du courant, donc la commande est plus simple.

L'inconvénient est que l'on "double" le nombre d'enroulement, donc le moteur est plus coûteux et encombrant, néanmoins il reste très courant pour les petites puissances.

Le schéma ci-dessous illustre le fonctionnement "unipolaire et pas entiers":

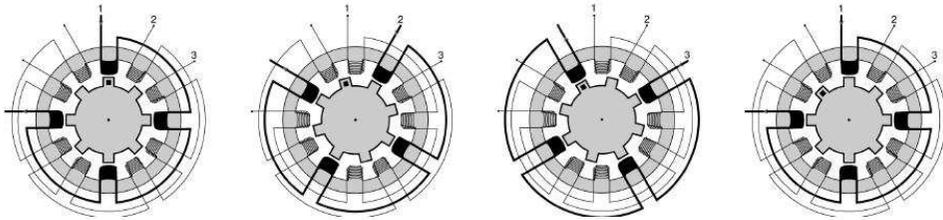


③ Le moteur pas à pas à réluctance variable

Le rotor ne comporte pas d'aimant, mais un noyau en fer doux et denté qui possède la propriété de canaliser les lignes de champ.
La propriété physique utilisée est la force d'attraction entre un aimant et un métal ferreux.

■ Etude d'un exemple

Prenons l'exemple d'un moteur constitué de 12 pôles au stator ($n_s = 12$ plots) et $n_r = 8$ dents au rotor (schéma ci-dessous):



Les 3 phases du moteur sont alimentées cycliquement, ce qui provoque la rotation (la dent la plus proche se positionne face à la bobine alimentée).
La résolution est $n_p = 24$ pas/tr (angle de pas de 15°).

■ Cas général

A chaque commutation, l'angle de rotation est $\alpha_p = \frac{360}{n_s} - \frac{360}{n_r} = 360 \frac{n_r - n_s}{n_r \cdot n_s}$

La relation donnant la résolution n_p en fonction de n_s et n_r est : $n_p = \frac{360}{\alpha_p} = \frac{n_s \cdot n_r}{n_s - n_r}$.

■ Propriétés

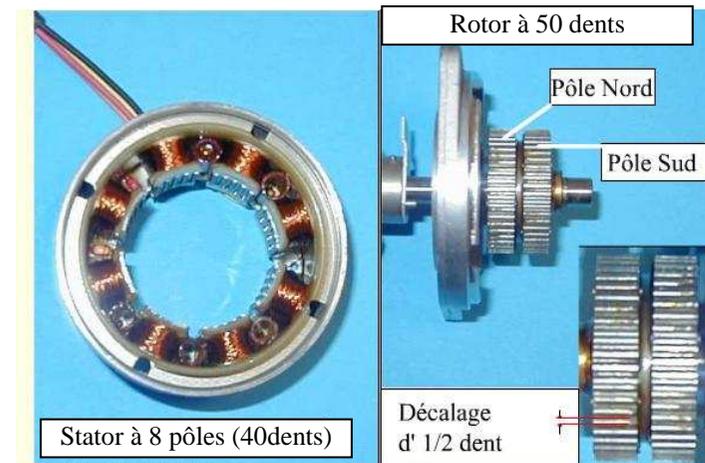
Le moteur à réluctance variable possède un nombre de pas élevé et sa construction est simplifiée (pas d'aimant au rotor).
Il comporte deux défauts : un couple de travail faible et un couple nul lorsqu'il n'est plus alimenté.

④ Le moteur pas à pas à hybride

Le moteur hybride est une combinaison des deux types de moteurs précédents.
Le rotor est constitué d'aimants dentés ce qui donne un fort couple et un nombre de pas par tour élevé.

■ Etude d'un exemple

Prenons l'exemple d'un moteur constitué de 8 pôles au stator ($n_s = 48$ dents) et $n_r = 50$ dents au rotor (photo ci-dessous):



Le nombre de pas par tour est : $n_p = \frac{40 \times 50}{50 - 40} = 200$ pas/tour.

⑤ Comparaison des trois types de moteur

Type de moteur	Aimant permanent	Réluctance variable	Hybride
Coût	Faible	Elevé	Elevé
Résolution	Moyenne (48 maximum)	Bonne (de 200 à 400)	Elevée (200, 400 et plus)
Couple et Puissance	Elevé	Faible	Elevé
Puissance	$\approx 10W$	$\approx 1W$	jusqu'à 2kW
Défauts	Nombre de pas faible	Pas de couple de blocage à l'arrêt	Coût élevé

⑥ Comportement mécanique des moteurs pas à pas

■ Caractéristiques statiques

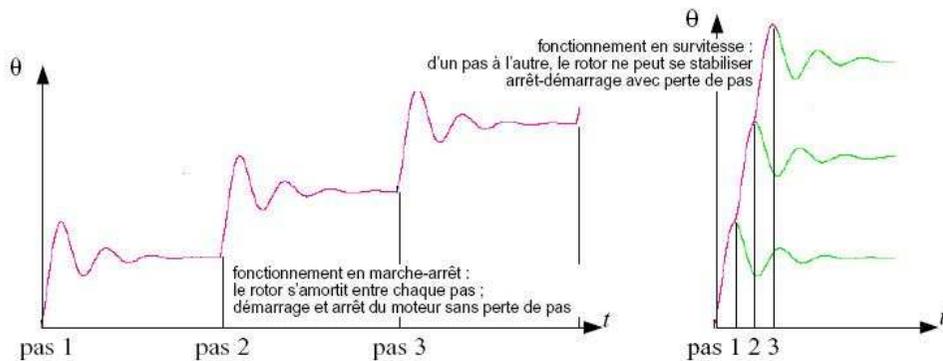
Couple de maintien : couple minimum à appliquer au **moteur alimenté** pour occasionner sa rotation.

Couple de détente : même définition mais avec le **moteur non alimenté** (nul pour le moteur à réluctance variable).

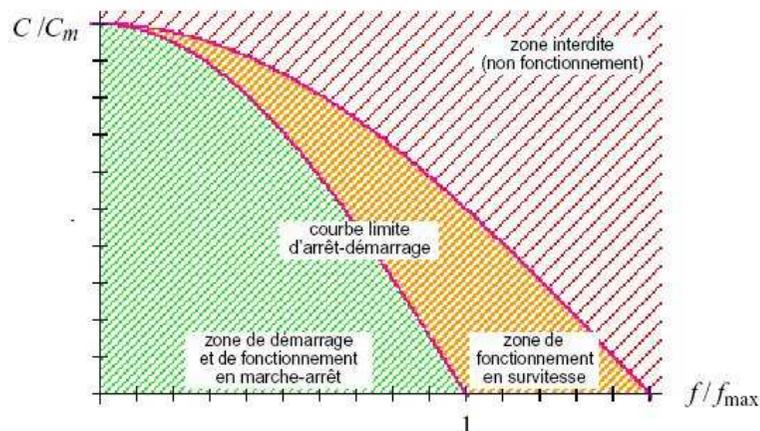
■ Caractéristiques dynamiques

A chaque commutation, le moteur se comporte comme un système du 2^o ordre (oscillations amorties de l'angle θ de rotation).

Il existe une fréquence limite de commande du moteur (schéma ci-dessous) :



Le schéma ci-dessous montre les différents modes de fonctionnement avec C couple résistant et f fréquence d'alimentation (C_m couple maximum et f_{max} fréquence maximale):



On peut donc considérer trois modes de fonctionnement possibles :

Fonctionnement par à-coups :

Le positionnement du rotor s'amortit entre chaque pas, ce qui ne pose aucun problème de fonctionnement.

Fonctionnement en continu :

Si on élève assez la fréquence de commutation, on arrive à un régime de vitesse quasi constant (survitesse). C'est le régime synchrone. C'est la vitesse limite de bon fonctionnement du moteur.

Il faut utiliser un démarrage progressif pour atteindre le régime continu sans perte de pas.

Propriétés importantes à retenir

- La résolution ou le nombre de pas par tour N_p est donné par:

$$\text{Résolution} \rightarrow N_p = \frac{360}{\alpha_p} \leftarrow \text{Pas en degré}$$

- Les trois familles principales sont:
 - moteur à aimant permanent (fort couple mais faible résolution);
 - moteur à réluctance variable (couple faible mais bonne résolution);
 - moteur hybride (fort couple et bonne résolution).
- L'alimentation des moteurs se fait de deux façons:
 - moteur unipolaire (bobines à point milieu, une seule tension);
 - moteur bipolaire (pas de point milieu donc deux tensions symétriques).

III- GÉNÉRALITÉS SUR LE COUPLAGE MACHINE-CHARGE

1- Couplage moteur-charge

Le couplage d'une charge à un moteur doit respecter deux règles principales :

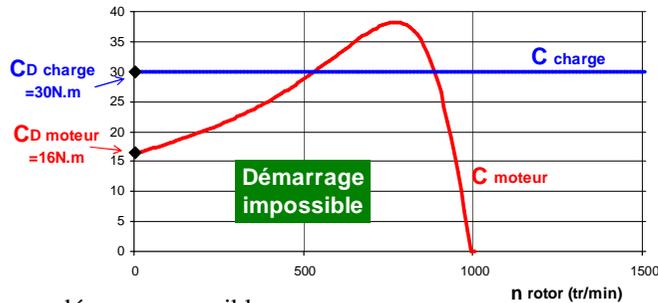
- Le moteur doit être capable de démarrer avec sa charge.
- Après démarrage la vitesse et le couple doivent se stabiliser à des valeurs admissibles par le moteur et la charge (point de fonctionnement).

Prenons l'exemple d'un moteur asynchrone avec successivement plusieurs charges :

① Charge de type "traction" à couple constant

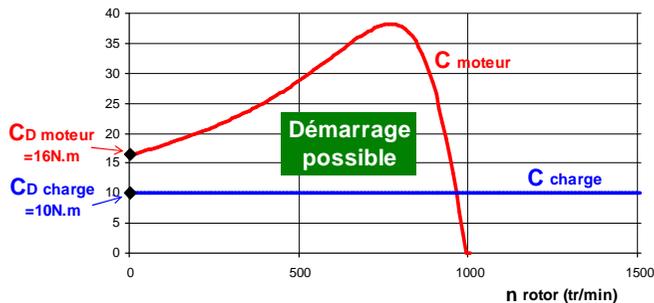
■ 1° cas : démarrage impossible

Dans le cas illustré ci-dessous, le démarrage est impossible car à **vitesse nulle ($n=0$)**, la charge demande un couple de démarrage $T_{D\text{ charge}} = 30\text{N.m}$ **supérieur** au couple de démarrage moteur $T_{D\text{ moteur}} = 16\text{N.m}$.



■ 2° cas : démarrage possible

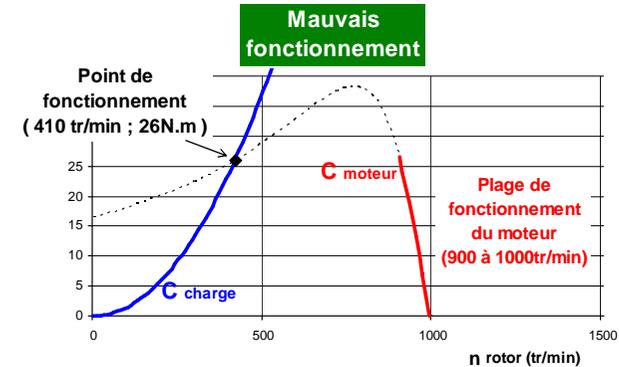
Dans le cas illustré ci-dessous, le démarrage est possible car à **vitesse nulle ($n=0$)**, la charge demande un couple de démarrage $T_{D\text{ charge}} = 10\text{N.m}$ **inférieur** au couple de démarrage moteur $T_{D\text{ moteur}} = 16\text{N.m}$.



② Charge de type "ventilateur"

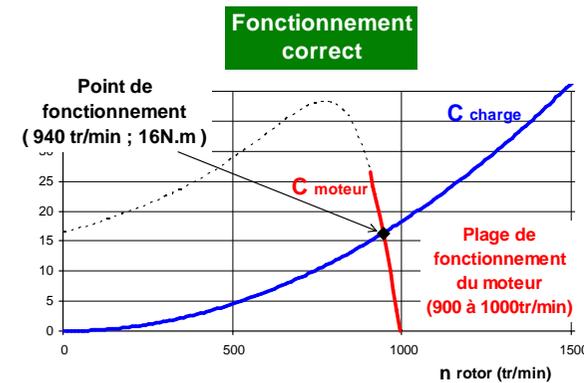
■ 1° cas : point de fonctionnement non compatible avec le moteur

Après démarrage, la vitesse augmente et se stabilise à $n = 410$ tr/min. Le moteur ne fonctionne bien qu'entre 900 et 1000 tr/min. Le moteur n'est donc pas adapté à la charge (schéma ci-dessous):



■ 2° cas : point de fonctionnement compatible avec le moteur

Après démarrage, la vitesse augmente et se stabilise à $n = 940$ tr/min. Le moteur ne fonctionne bien qu'entre 900 et 1000 tr/min. Le moteur est donc adapté à la charge (schéma suivant):

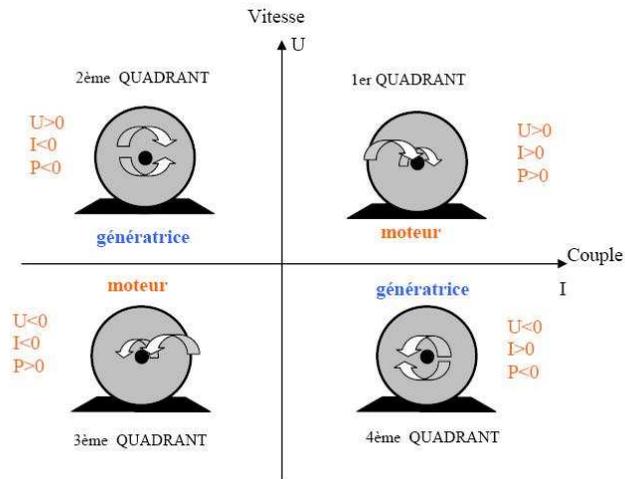


2- Caractéristique "quatre quadrants"

Une machine électrique peut fonctionner en moteur ou en génératrice avec les deux sens possibles de rotation.

La courbe "vitesse fonction du couple" sera inscrite sur un graphe à quatre zones.

Prenons l'exemple de la machine à courant continu qui peut fonctionner en moteur ou en génératrice:



Par exemple lors d'un déplacement horizontal (cas d'un train), la machine fonctionne :

- à l'aller, en **moteur** dans le **quadrant 1** avec $P > 0$
- au retour, toujours en **moteur** dans le **quadrant 3** avec $P > 0$,
- entre ces deux cas, le **freinage** ($P < 0$) jusqu'à l'arrêt s'effectue dans le **quadrant 2** pour l'aller et dans le **quadrant 4** pour le retour.