

Machine à courant continu

Contenu

1	HISTORIQUE	2
2	SYMBOLES	3
3	CONSTITUTION	3
5	MODELE EQUIVALENT ELECTRIQUE	7
5.1	MCC A AIMANTS	7
5.2	MCC A INDUCTEUR BOBINE	8
6	BILAN DE PUISSANCE (FONCTIONNEMENT MOTEUR)	8
7	CONTROLE D'UNE MCC	9
7.1	QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT	9
7.2	REGLAGE DE LA VITESSE	9
7.2.1	<i>Expression de la vitesse</i>	9
7.2.2	<i>Réglage par la tension d'induit</i>	9
7.3	REGLAGE DU COUPLE	10
8	DIFFERENTS TYPES DE MACHINE A COURANT CONTINU	10
8.1	EXCITATION INDEPENDANTE	10
8.2	EXCITATION PAR AIMANTS PERMANENTS.....	11
8.3	EXCITATION SERIE : MOTEUR UNIVERSEL	11
8.4	MOTEUR LINEAIRE	11
8.5	MOTEUR PLAT	12
8.6	MOTEUR A COURANT CONTINU SANS BALAIS	12

1 HISTORIQUE

1870 Bricoleur de génie et ébéniste chez l'orfèvre Christofle, Zénobe Gramme (1826-1901), après avoir observé les faiblesses des machines Alliance de son employeur, met au point la première dynamo Industrielle.

En 1871, il fonde la Société des machines magnétoélectriques Gramme avec son ami Hippolyte Fontaine (qui a découvert la réversibilité et a permis le remplacement des machines à vapeur pour l'entraînement).



exposition de Berlin 1879
tramway de Siemens

1879 Ernst Werner Siemens développe un premier tramway sur rail à Berlin (une locomotive, 3 petits wagons chacun chargés de 6 personnes).

1899 La voiture électrique du belge Jenatzy décroche le record du monde de vitesse et atteint les 105,9 km/h à Achères le 6 mai 1899. Son nom restera également associé à la conception de plusieurs voitures électriques ou mixtes (pétroléo-électriques).

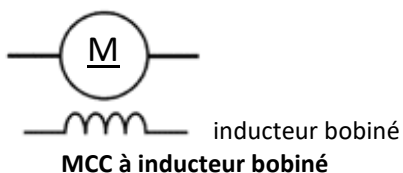


Au cours du **XXe siècle**, la machine à courant continu est restée incontournable dans de nombreuses applications :

- La traction qui demande un fort couple à très basse vitesse,
- Le domaine de la vitesse variable,
- Les systèmes embarqués alimentés par batteries.

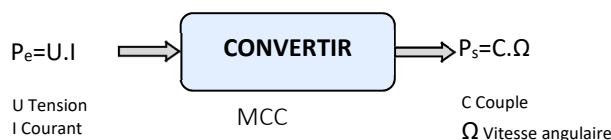
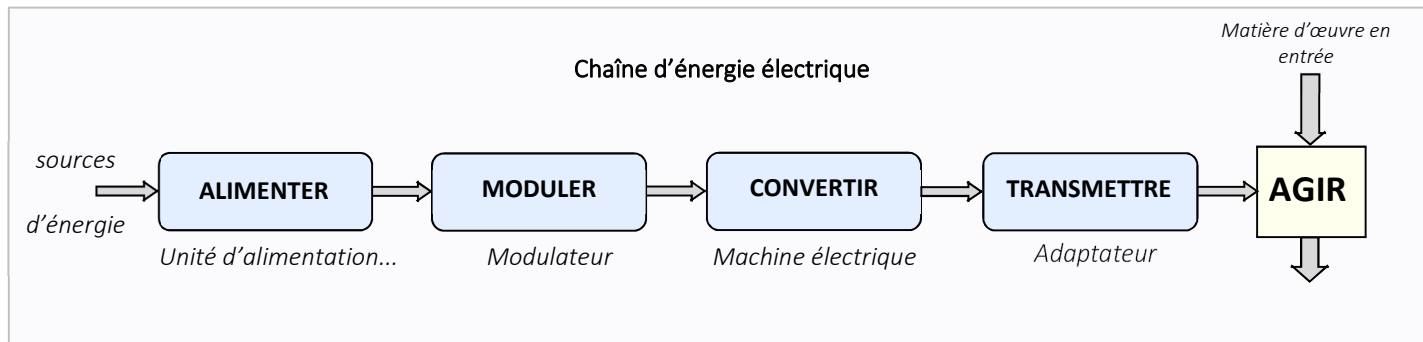
...Actuellement, la machine à courant continu tend à être remplacée par des machines alternatives, (elle a quasiment disparu des entraînements de forte puissance, sauf en remplacement dans une installation existante), mais elle reste présente dans les petites puissances et la robotique : elle est par exemple très utilisée en automobile, pour des actionneurs enfouis (climatisation, sièges, rétroviseurs...).

2 SYMBOLES



Fonction

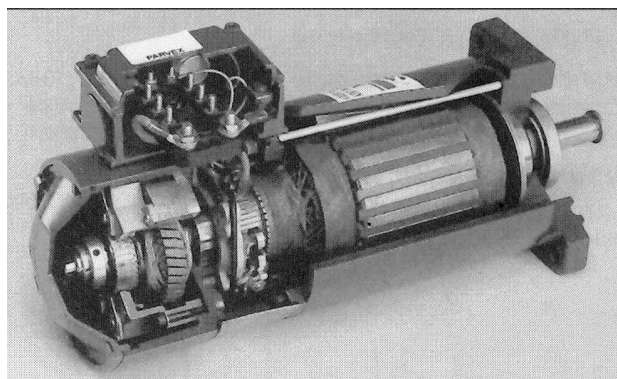
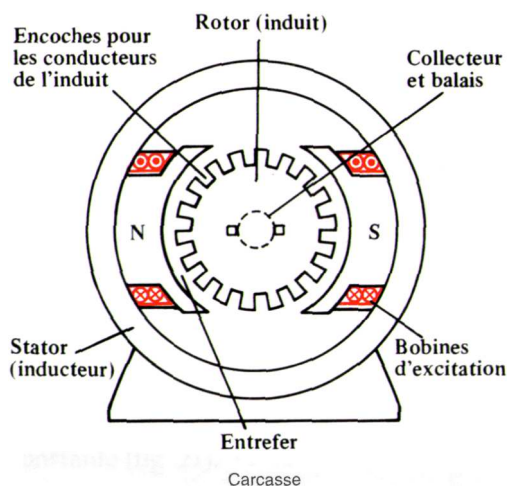
Dans la chaîne d'énergie, la machine à courant continu assure la fonction **CONVERTIR** (l'énergie change de nature).



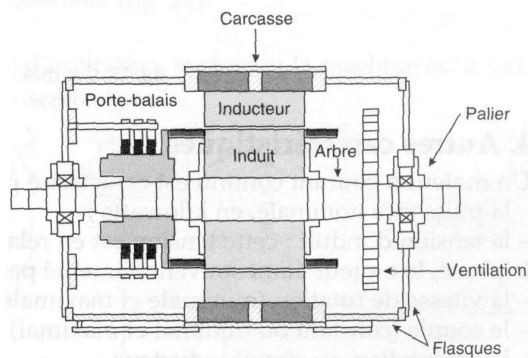
C'est un convertisseur électromécanique réversible

☞ Pour que la réversibilité soit utilisable, il faut que toute la chaîne d'énergie soit réversible.

3 CONSTITUTION

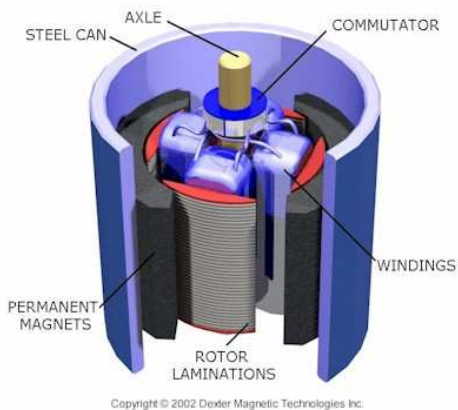


Machine à courant continu ouverte (Parvex).



La MCC comprend :

- un circuit magnétique comportant une partie fixe, le **stator**, une partie tournant, le **rotor** et l'**entrefer** l'espace entre les deux parties.
- une source de champ magnétique nommée l'**inducteur** (le stator) créée par un bobinage ou des aimants permanents
- un circuit électrique **induit** (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques
- le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotorique



3.1 Inducteur :

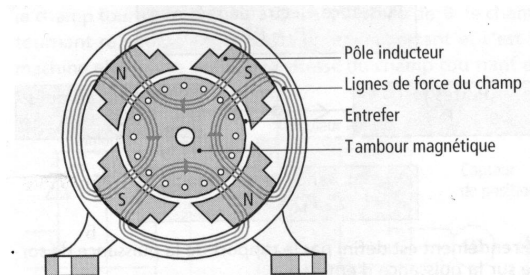
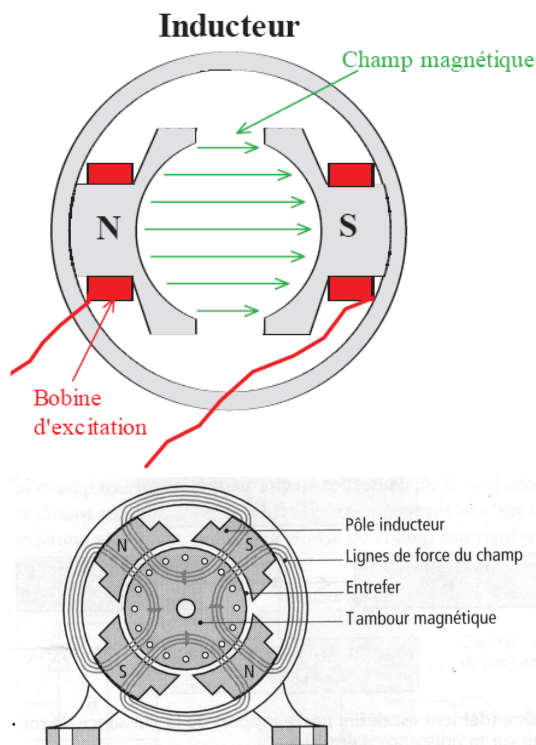
C'est la partie qui crée le champ magnétique.

Deux moyens peuvent être utilisés pour créer un champ magnétique au stator :

- utiliser des aimants
- utiliser une bobine électrique.

Les pôles inducteurs forment le circuit magnétique et sont en tôles magnétiques isolées. Ce feuilletage permet de limiter les pertes par courant de Foucault et par Hystérésis. Pour canaliser les lignes de champ, un circuit ferromagnétique sera utilisé.

Les bobines inductrices entourent les pôles de l'inducteur. Le flux magnétique est produit par le passage du courant électrique dans les spires des bobines. Elles sont branchées de telle sorte que leurs épanouissements polaires définissent un pôle nord et un pôle sud.



3.2 L'induit

L'induit tourne dans un champ magnétique fixe d'où la création de pertes par hystérésis et courants de Foucault. Ceci interdirait la rotation d'un cylindre plein, l'induit est donc feuilleté (tôles en acier au silicium).

A la périphérie de l'induit : on trouve les encoches où viennent se loger les conducteurs de l'induit.

Le diamètre extérieur de l'induit est inférieur de quelques mm au diamètre intérieur de l'inducteur. On obtient ainsi un entrefer très faible, ce qui permet d'avoir un meilleur rendement de la machine.

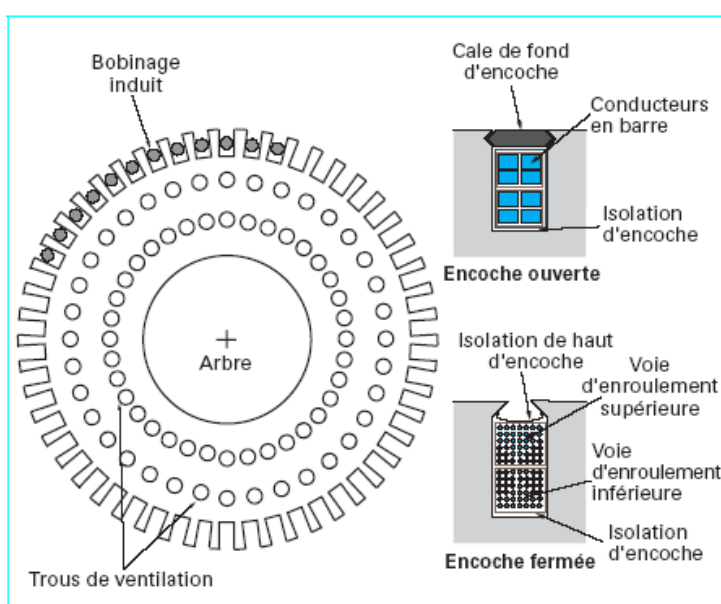
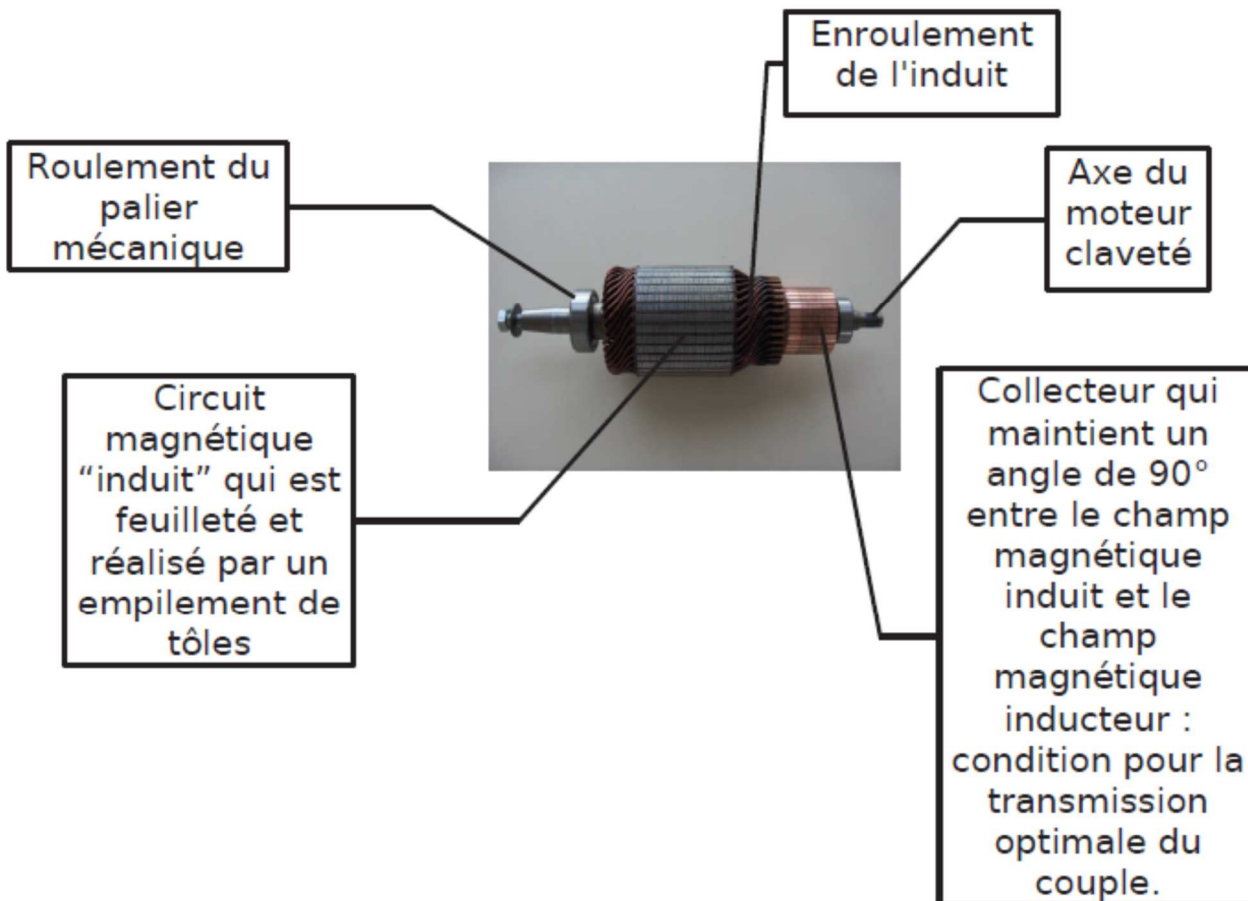
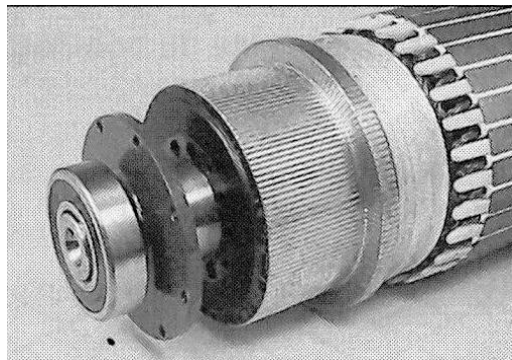


Figure 9 - Tôle rotorique

Le collecteur est placé à l'entrée de l'induit. Il est formé de lames de cuivre isolées entre elles par du mica.

Sur le talon de la lame ou ailette, sont soudées l'entrée d'un bobinage et la sortie d'un autre.

Le bobinage d'induit est constitué de fils de cuivre recouverts de vernis isolant. Les spires sont regroupées en sections. Les sections sont regroupées en bobines.

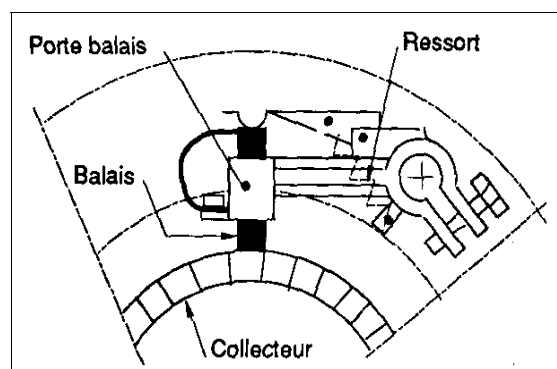


La liaison électrique entre partie fixe et partie mobile est assurée par des balais fixés sur la carcasse par l'intermédiaire d'un porte-balais.

Le contact est assuré par le frottement de glissement sur le collecteur. Les lames sont en carbone fritté.

L'usure des balais sur la lame du collecteur nécessite une vérification constante et un changement régulier.

La résistance d'induit est due aux conducteurs, au collecteur et aux balais et leurs contacts.



4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

4.1 Force électromotrice E

Deux conducteurs diamétralement opposés sont associés pour constituer une spire. Celle-ci, traversée par un courant positif, embrassant, par convention, un flux propre positif, est le siège d'une f.e.m. induite d'expression (en convention générateur) :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ loi de Lenz}$$

Pour l'ensemble des spires (elles-mêmes sur des voies d'enroulements) on obtient une fore électromotrice globale :

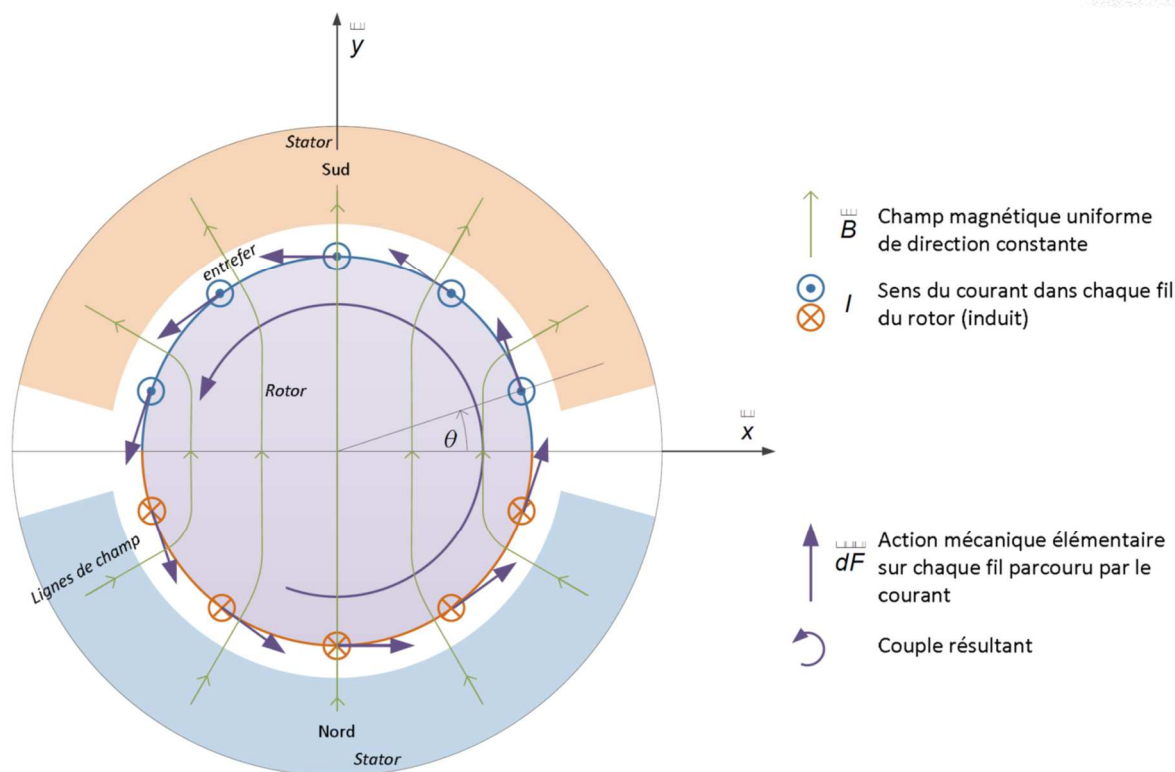
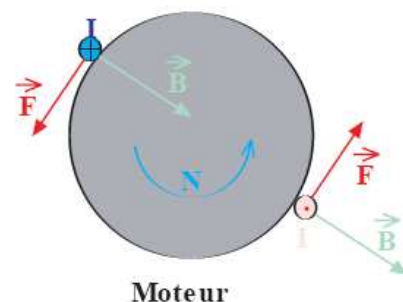
$$E = K_E \cdot \Phi \cdot \Omega$$

E en V
 Φ en Weber (flux inducteur)
 Ω en rad/s

Si la machine est à aimants, le flux est constant et on pourra écrire directement $E = K_E \cdot \Omega$

4.2 Création du couple

En mode de fonctionnement moteur, on envoie un courant continu I_m dans le circuit d'induit. Soit I le courant qui circule alors dans chaque brin conducteur placé à la périphérie du cylindre rotorique. Chaque brin de longueur l est soumis à une force de Laplace puisque I et B sont orthogonaux. De plus cette force est tangentielle et toutes les forces ajoutent leurs effets pour fournir le couple moteur total C_m .



Le couple électromagnétique du moteur a pour expression : $C_{em} = K_c \cdot \Phi \cdot I$

5 MODELE EQUIVALENT ELECTRIQUE

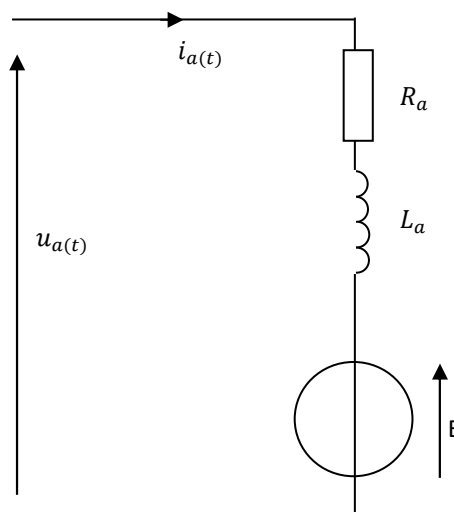
5.1 MCC à aimants

Pour une machine à aimants permanents, le flux Φ du champ magnétique inducteur est constant.

L'induit d'une MCC étant constitué d'un bobinage fixé sur un circuit magnétique en mouvement dans un champ magnétique, le modèle comporte :

- La résistance du bobinage d'induit R_a .
- L'inductance du bobinage d'induit L_a .

Dès que la machine est en rotation, une force électromotrice E .



EQUATIONS ELECTRIQUES (par la loi des mailles)

$$U_{a(t)} = E + R_a i_{a(t)} + L_a \frac{di_a}{dt}$$

EQUATION MECANIQUE (Principe Fondamental de la Dynamique)

$$J \frac{d\Omega_{R/S}}{dt} = C_{acc}(t) = C_{m(t)} - C_r(t)$$

EQUATIONS DE COUPLAGE ELECTROMECHANIQUE

Deux relations de couplage électromécanique interviennent entre les relations électriques et les relations mécaniques au niveau de l'entrefer.

Force électromotrice (FEM) $E = K \cdot \Omega_{R/S}$ (K en V.s)

Couple électromagnétique $C_{em} = C_p + C_m = K \cdot I_a$ (K en Nm/A)

Symbole	unité	description
U	(V)	Tension d'alimentation de l'induit de la machine à courant continu
I_a	(A)	Intensité du courant électrique absorbé par la machine
R_a	(Ω)	Résistance du bobinage de l'induit
L_a	(H)	Inductance du bobinage de l'induit
E	(V)	f.e.m force électromotrice (Loi de Faraday, réaction de l'induit au champ magnétique de l'inducteur)
C_{em}	(N.m)	Couple électromagnétique de la machine (action du stator sur le rotor)
C_{acc}	(N.m)	Couple d'accélération de la machine
$C_m = C_u$	(N.m)	Couple moteur ou couple utile
C_r	(N.m)	Couple résistant dû à la charge
C_p	(N.m)	Couple de perte de la machine
J	(kg.m ²)	Inertie équivalente du rotor et de la charge mécanique
$\Omega_{R/S}$	(rad/s)	vitesse angulaire de la machine
K		Constante de couple (Nm/A) ou Constante de fem (V/rad/s)
τ_e	(s)	Constante de temps électrique $\tau_e = \frac{L}{R}$
τ_{em}	(s)	Constante de temps électromécanique $\tau_{em} = \frac{RJ}{k^2}$

5.2 MCC à inducteur bobiné

'inducteur, s'il est bobiné, se modélise par

- une résistance R_e
- une inductance L_e .

Comme il est immobile dans le champ, il n'y a pas de fem induite.

EQUATIONS ELECTRIQUES

Induit

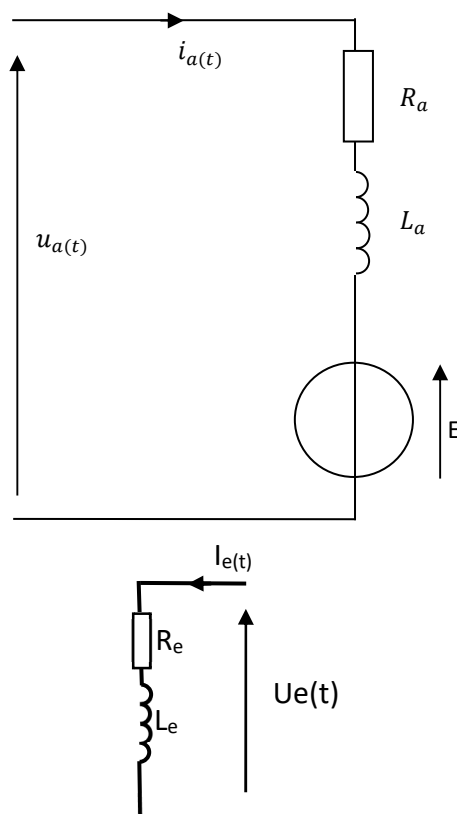
$$U_{a(t)} = E + R_a \cdot I_{a(t)} + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt}$$

Inducteur

$$U_e = R_e \cdot I_e + L_e \cdot \frac{dI_e}{dt}$$

EQUATION MECANIQUE

$$J \frac{d\Omega_{R/S}}{dt} = C_{em(t)} - C_{p(t)} - C_{r(t)}$$



EQUATIONS DE COUPLAGE ELECTROMECHANIQUE

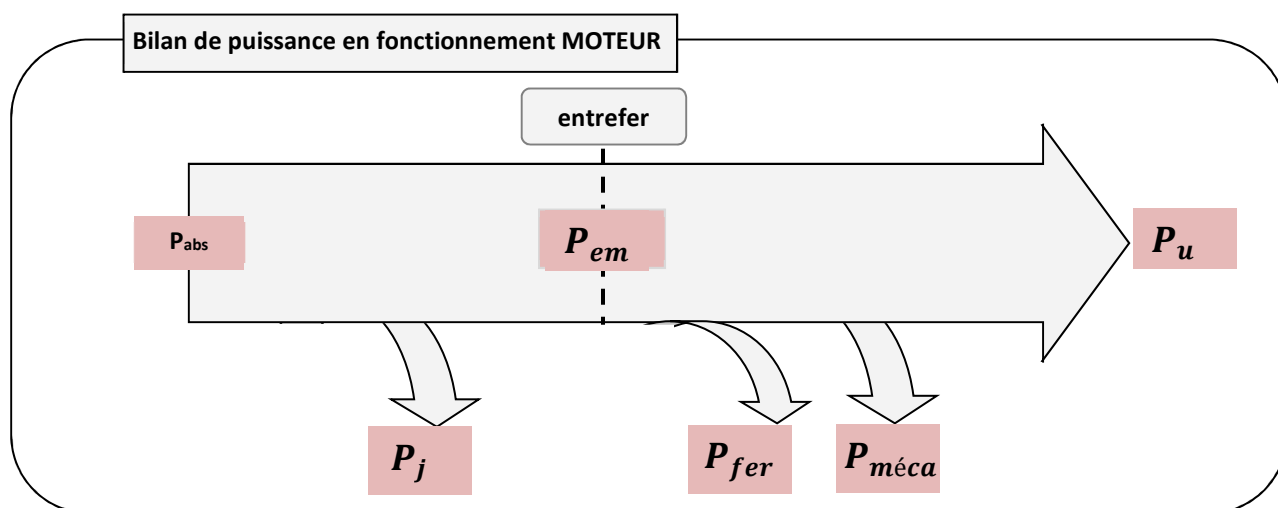
Les deux relations de couplage électromécanique font apparaître la valeur du flux Φ comme paramètre.

Force électromotrice (FEM) $E = K \cdot \phi \cdot \Omega_{R/S}$

Couple électromagnétique $C_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a$

Avec $\Omega_{R/S}$ vitesse de rotation du rotor, K constante de construction de la machine et Φ flux inducteur.

6 BILAN DE PUISSANCE (FONCTIONNEMENT MOTEUR)



Un bilan des pertes renseigne sur la machine. Elles sont d'ordre

- Thermique (p_j) : Pertes Joules dans l'enroulement d'excitation et Pertes Joules dans l'induit.
- Magnétique dans l'induit ($p_F = \text{pertes fer}$) : Pertes par courants de Foucault et Pertes par hystérésis.
- Mécaniques ($p_{méca}$) : Pertes par frottements et Pertes par ventilation.

Les pertes magnétiques sont essentiellement localisées au rotor, elles dépendent de la valeur du champ magnétique et de la vitesse du rotor. Elles sont limitées en utilisant des matériaux à cycle d'hystérésis étroits (Acier au Silicium) et en feuilletant l'induit.

Remarque : Dans le cas où la machine est utilisée à vitesse et flux constants, les pertes $P_{fer} + P_{méca}$ sont constantes, d'où le nom de PERTES CONSTANTES qui leur est souvent donné : $P_c = P_{fer} + P_{méca}$

Symbole	expression	description
P_{abs}	$P_{abs\text{induit}} = U_a \cdot I_a$	En entrée la puissance absorbée est de nature électrique.
	$P_{abs\text{inducteur}} = U_e \cdot I_e$	Dans le cas où la machine à courant continu n'est pas à aimants permanents, l'inducteur est bobiné et traversé par un courant d'excitation I_e .
P_{em}	$P_{em} = E \cdot I_a$ $= C_{em} \cdot \Omega_{R/S}$	Dans l'entrefer, la puissance transférée du stator au rotor est de nature électromagnétique. Elle s'exprime sous forme mécanique et électrique.
P_u	$P_u = C_u \cdot \Omega_{R/S}$	En sortie, la puissance utile est de nature mécanique.
P_j	$P_j = R_a \cdot I_a^2 (+ R_e \cdot I_e^2)$	Puissance perdue de nature calorifique (pertes joules) qui s'exprime sous forme électrique.
$P_c = P_{fer} + P_{méca}$	$P_c = C_p \cdot \Omega_{R/S}$	Puissance collective perdue de nature mécanique et magnétique.

7 CONTROLE D'UNE MCC

7.1 Quadrants de fonctionnement

Conventionnellement lorsque La fem E et le courant d'induit moyen $\langle I_a \rangle$ sont positifs, la machine fonctionne dans le premier quadrant en mode moteur.

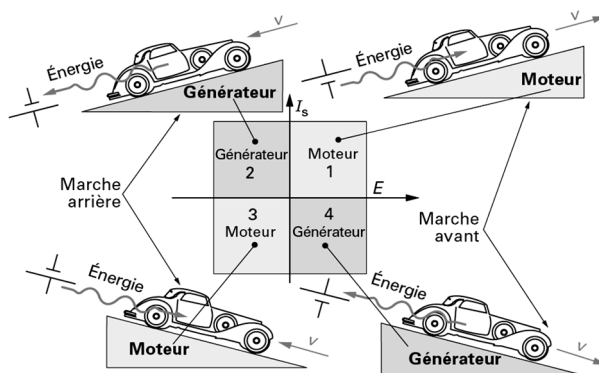
L'inversion d'un de ces deux termes permet d'obtenir un mode générateur (Quadrants 2 ou 4).

L'inversion simultanée des 2 termes permet d'obtenir un fonctionnement moteur avec un sens de rotation inversé (Quadrant 3).

Le fonctionnement en mode générateur nécessite une charge mécanique entraînant soit :

- **ponctuellement** par restitution d'énergie cinétique ou potentielle lors respectivement d'un freinage ou de la descente d'une charge mécanique (levage).
- **En permanence** lors d'un entraînement par un couple moteur extérieur (éolienne, turbine...).

L'accès à ces différents points de fonctionnements dépend fortement de l'électronique de puissance (hacheur) et de contrôle qui sont associées à la MCC.



7.2 Réglage de la vitesse

7.2.1 Expression de la vitesse

L'expression de la vitesse du moteur est obtenue à partir de la relation donnant sa f.e.m. $E = K \cdot \Omega_{R/S} \cdot \phi$ et de la loi des mailles en convention récepteur.

$$\Omega_{R/S} = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K \cdot \phi}$$

Les paramètres agissant sur la vitesse du moteur sont donc :

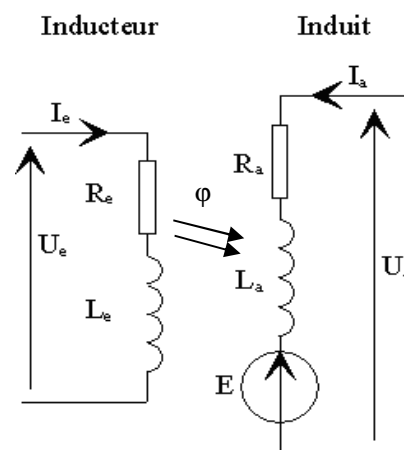
- La tension d'alimentation de l'induit,
- Le flux d'excitation de la machine,

Le terme $R_a \cdot I_a$ étant petit devant U_a , le courant I_a influence peu la vitesse.

7.2.2 Réglage par la tension d'induit

L'action sur la tension U_a n'affecte pas le couple électromagnétique ($C_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a$) et si on néglige l'influence le terme $R_a \cdot I_a$ devant U_a , on constate que la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit.

Le mode de réglage de la vitesse est à COUPLE CONSTANT



7.2.3 Réglage par le flux (défluxage)

L'étude des relations donnant le couple ($C_{em} = K \cdot \phi \cdot I_a$) et la vitesse ($\Omega_{R/S} = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K \cdot \phi}$) montre que l'augmentation de

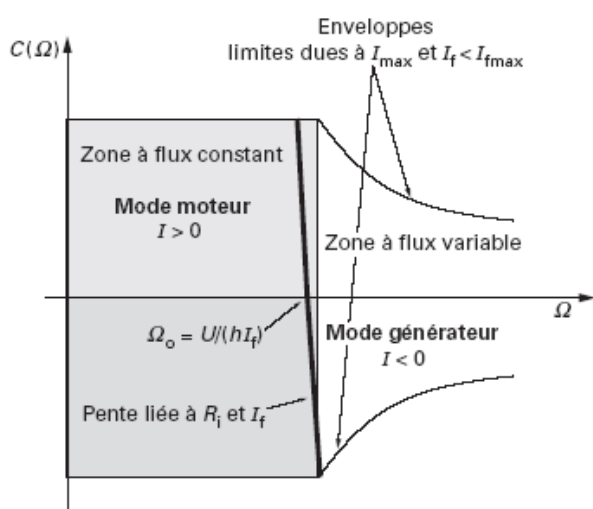
vitesse (quand ϕ diminue) est obtenue au détriment du couple qui baisse dans les mêmes proportions.

Le mode de réglage de la vitesse est à PUISSANCE CONSTANTE

7.3 Réglage du couple

La machine à courant continu reste commandée par la tension d'induit mais la stratégie de pilotage est déterminée par le courant. Par exemple, pour maintenir le couple constant sur une charge, on mesure le courant de l'induit et on construit une commande qui permet de maintenir cette valeur constante. La commande va élaborer la valeur de la tension d'induit nécessaire à cette stratégie.

7.4 Caractéristiques Couple-vitesse :



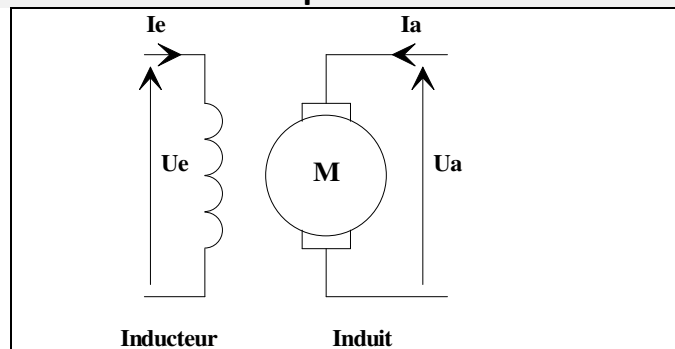
Limites de la variation de vitesse :

- électrique : tension d'induit limitée à U_{max} (tension d'isolement des lames du collecteur), courant I limité (échauffement dans les bobinages)
- mécanique : vitesse limitée par contraintes dues aux efforts centrifuges sur les masses en mouvement
- thermique : il faut souvent ajouter une hélice pour refroidir le moteur sinon il devra être déclassé (perte de puissance)

8 DIFFERENTS TYPES DE MACHINE A COURANT CONTINU

Les machines à courant continu sont classées par le moyen utilisé pour créer le champ inducteur.

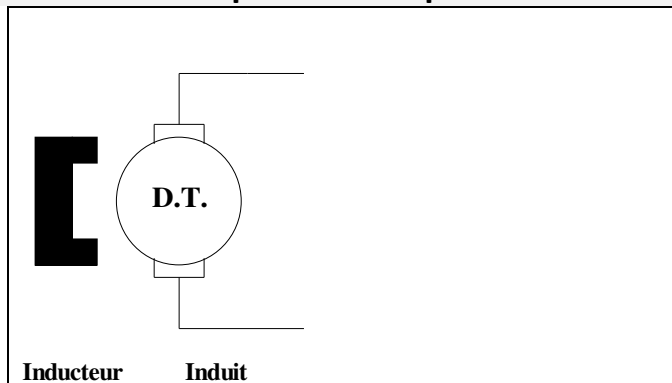
8.1 Excitation indépendante



L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement. Large gamme de vitesse.

Machines outils : Moteur de broche, d'axe.

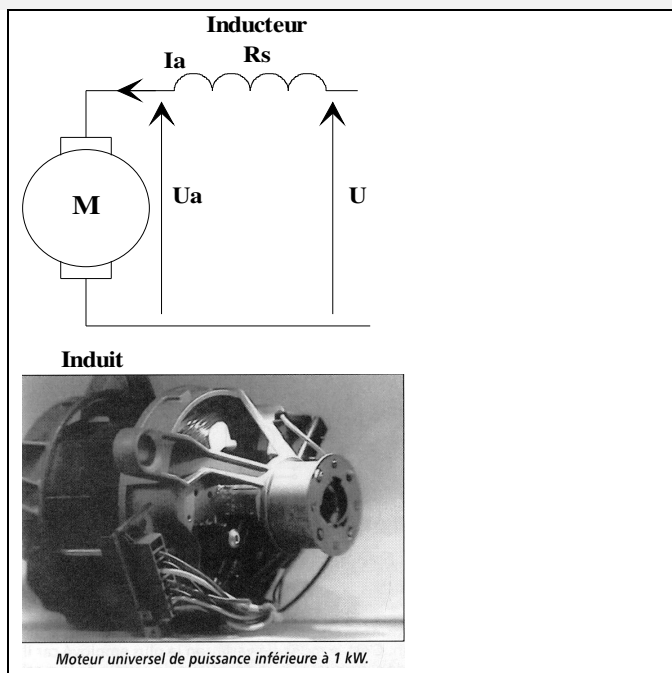
8.2 Excitation par aimants permanents



On retrouve les caractéristiques de l'excitation indépendante sans action possible sur le flux. Les machines ne pourront pas dépasser la vitesse limite fixée par la tension d'alimentation maximale.

Le développement de la technologie des aimants a permis la réalisation de machines de quelques mW à quelques kW.

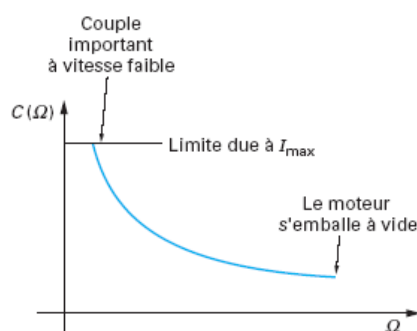
8.3 Excitation série : moteur universel



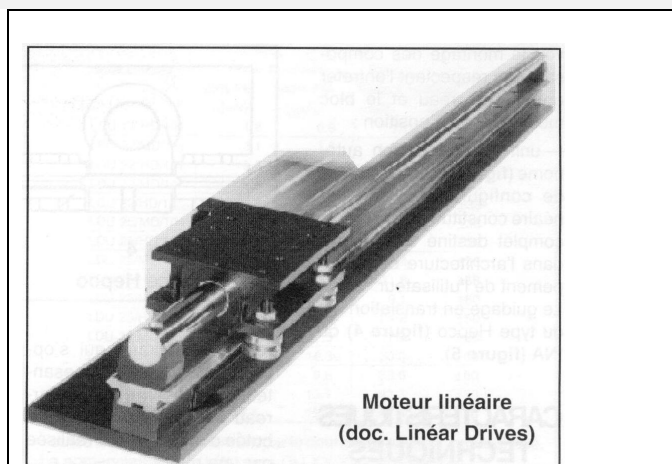
Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse.

Traction ferroviaire, palans, ponts roulants, ventilateurs, pompes centrifuges.

Pouvant être alimenté en courant alternatif, il sert à entraîner les appareils électroménagers pour lesquels une grande vitesse est requise (moulin à café, aspirateur, perceuse...).



8.4 moteur linéaire

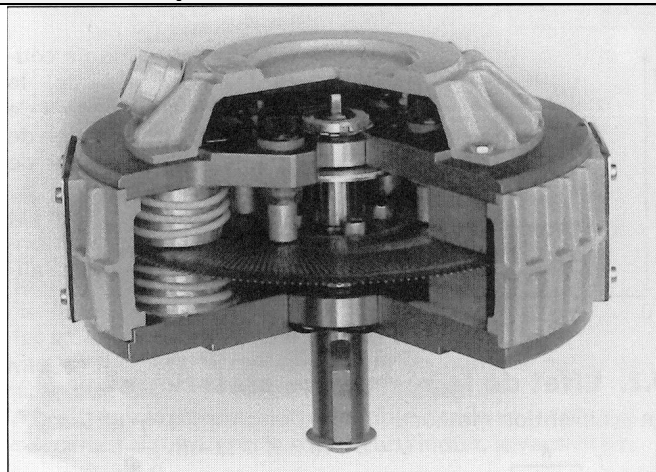


Ils sont utilisés dans les vérins électromécaniques....

Lorsque les bobines du bloc mobile sont alimentées, un champ magnétique s'établit.

L'interaction avec les champs magnétiques qui émanent du barreau donne naissance à des forces d'attraction et de répulsion, ce qui permet un déplacement linéaire.

8.5 moteur plat



Moteur à entrefer plan (Invensys-Parvex.)

Ces moteurs ont un entrefer axial ou plan.
 L'induit est un disque mince ne comportant que des isolants et des bobinages lamellaires.
 L'induit est donc sans fer, il tourne dans un champ magnétique multipolaire créé par des aimants permanents.
 Les balais portent directement sur les conducteurs en cuivre (moins d'usure)
 L'absence de fer diminue l'inertie thermique et mécanique.
 La résistance des bobinages est faible donc la tension d'alimentation l'est aussi.
 Ces moteurs, en utilisant des aimants de type AlNiCo à induction rémanente élevée, présentent un couple massique très important et un rendement correct (environ 85 %).
 Une excellente précision de positionnement et une excellente commutation sont donc obtenues. L'usure 4 fois plus faible des balais ajoutée aux qualités précédentes explique le maintien de cette technologie, pourtant déjà vieille.

8.6 moteur à courant continu sans balais

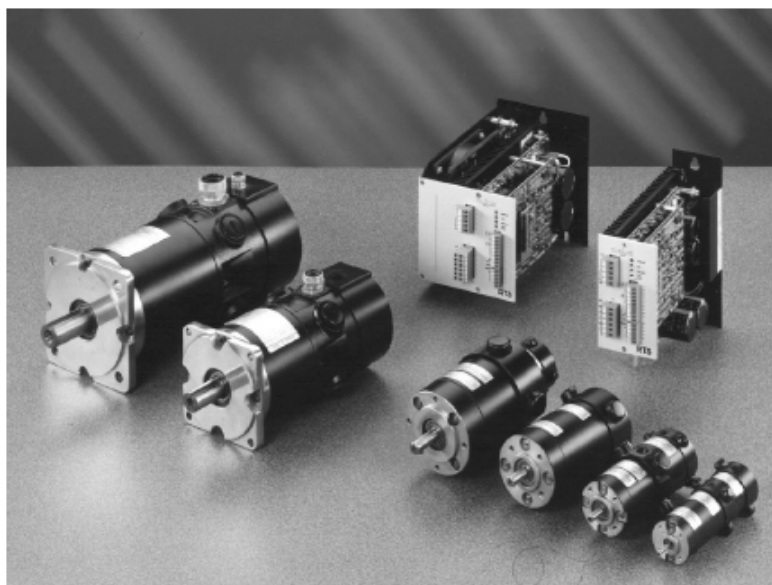


Figure 4 – Gamme de servomoteurs de puissance comprise entre 50 W et 5 kW [doc. Parvex]

Ces moteurs sont en réalité des moteurs synchrones autopilotés mais le principe de fonctionnement est relativement semblable à celui d'une MCC (réglage du couple indépendant de celui de la vitesse).

D'où le nom de MCC sans balais (donc sans collecteur d'où moins d'usure, de pollution sonore et électromagnétique).

La gamme de puissance est très étendue :

- entraînements de bandes, de disques (quelques 10W)
- servomoteurs en robotique : bras de robots, broches de machines-outils...(quelques 100W à 100kW)
- grande puissance : traction (TGVA), propulsion de bateaux,... (quelques MW à quelques 10MW)