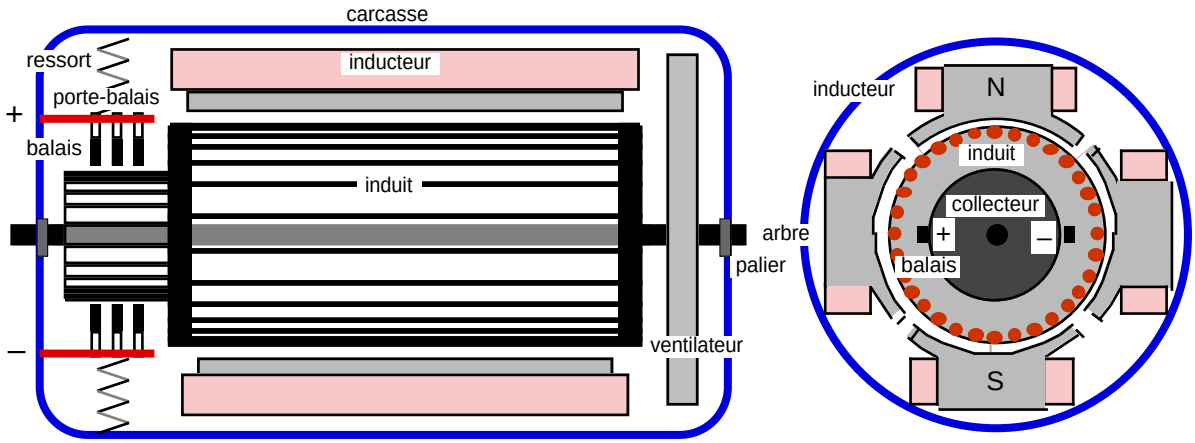
C32 - Machine à Courant Continu (MCC) à excitation séparée

Moteur à courant continu

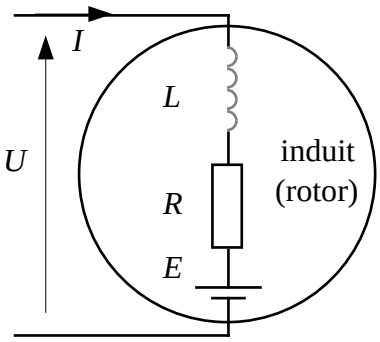
• ***Constitution (schéma simplifié).*** *Exemple : moteur à deux paires de pôles, inducteur bobiné :*
NB : pour les petites puissances, l'inducteur est un aimant permanent.



• ***Caractéristiques***
- Plage de variation de vitesse très grande (> 1000 en boucle d'asservissement)
- Couple de démarrage important, idéal pour l'entraînement de charges à forte inertie.
- Rapport volume/puissance très supérieur à toutes les autres technologies
- Rendement élevé
- Linéarité tension/vitesse, couple/courant

Mais :
- Prix élevé
- Maintenance coûteuse (remplacement des balais en graphite, usure du collecteur)
- Source importante de parasites (étincelles de commutation sur le collecteur ⇒ Pb CEM)

• ***Modèle électrique*** (cf §C31) :



(1) $U = E + R.I + \left(L\dfrac{dI}{dt}\right)$ loi des mailles

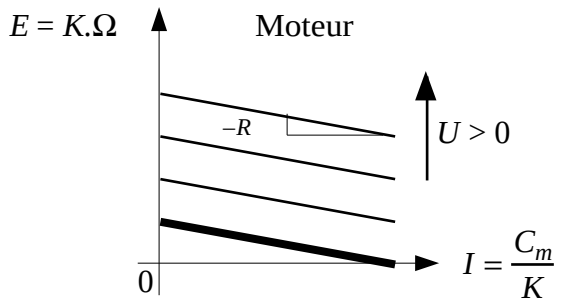
(2) $E = k\Phi\Omega = K.\Omega$ fcem (loi de Lenz)

- L'inducteur (bobinage ou aimant permanent) n'est pas représenté sur ce schéma. On s'intéresse uniquement aux MCC à excitation séparée, à flux Φ constant, commandées par l'induit.
- (eq. 1) Si l'inductance de l'induit est négligeable, l'équation (1) se réduit à : $U = E + R.I$

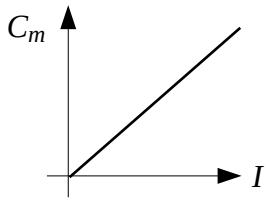
⚠ Tenir compte de la présence éventuelle d'une *inductance de lissage*, connectée en série au moteur, nécessaire pour le bon fonctionnement de son alimentation (pont à thyristors ou hacheur).

- (eq. 2) La loi détaillée est : $E = \dfrac{1}{2\pi}\dfrac{p}{a}N\Phi\Omega$, où p est le nb de paires de pôles, a le nb de voies d'enroulement, N le nb de conducteurs de l'induit. On a donc : $E = K.\Omega$, où K dépend de la géométrie de la machine et du bobinage rotorique, ainsi que du flux dans l'entrefer.

- *Caractéristique électrique E(I) d'un MCC :*



$$E = -RI + U$$
$$P = UI$$



• ***Conversion electromécanique***

- *Conversion électromécanique parfaite :*

(3) $C_m = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E.I}{\Omega} = K.I$

- *Remarque :* dans la réalité on distingue : $E = K_E.\Omega$ et $C_m = K_C.I$, où K_E est la constante électrique du moteur, et K_C sa constante mécanique. Mais dans la pratique, on peut confondre ces deux constantes et poser $K = K_E \approx K_C$.

- *Conversion électromécanique réelle : bilan des puissances*

Il est donné §C31 (conversion electromécanique réelle). Les pertes Joule électriques sont celles du rotor (P_{JR}). De (eq. 1) on obtient (en multipliant par I) : $UI = EI + RI^2$. Soit, en résumé :

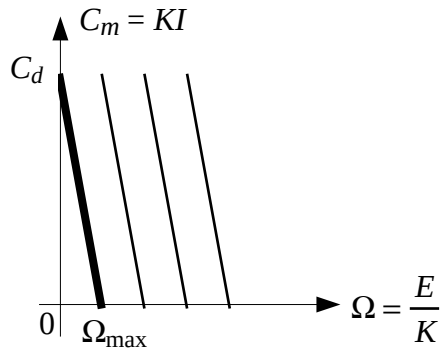
$$P_a = UI \xrightarrow{P_a = P_{em} + P_{JR}} P_{em} = EI = C_m\Omega \xrightarrow{P_{em} = P_F + P_u} P_u = C_u\Omega$$

$$P_{JR} = RI^2 \qquad P_F \qquad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

NB : on ne tient pas compte dans ce bilan de la puissance consommée par l'inducteur quand celui-ci est bobiné.

• ***Fonctionnement statique*** (Ω constante)

Des équations (1), (2) et (3) on déduit la *caractéristique statique mécanique* $C_m(\Omega)$:



(1), (2), (3) $\Rightarrow U = K\Omega + R\frac{C_m}{K}$

$\Rightarrow C_m = -\frac{K^2}{R}\Omega + \frac{K}{R}U$

avec : $C_d = \frac{K}{R}U$

et : $\Omega_{max} = \frac{U}{K}$

• ***Fonctionnement dynamique***

Il est régi par les équations (1), (2), (3) et (4) : $C_m = J\frac{d\Omega}{dt} + C_r$

Remarque : au démarrage (ou au freinage), on peut faire le calcul approximatif suivant :

$C_m = C_a + C_r$, où C_a est le couple d'accélération moyen : $C_a = J\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$.

Contrôle de vitesse : $U \rightarrow \Omega$

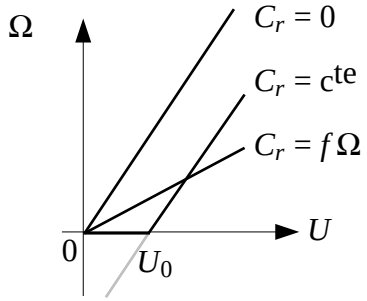
• *Fonctionnement statique*

Au point de fonctionnement de l'ensemble {moteur + charge}, on a : $C_m = C_r$. La relation $\Omega(U)$ à est établie à partir des équations (1), (2) et (3). On obtient :

$$\left.\begin{array}{r} U = K\Omega + R\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = C_r \end{array}\right\} \Rightarrow \Omega = \frac{U}{K} - \frac{RC_r}{K^2} = \frac{1}{K}\left(U - \frac{RC_r}{K}\right)$$

Il faut donc tenir compte du type de charge. Parmi les plus courantes, on trouve :

- $C_r = 0$: fonctionnement à vide. Cas limite envisageable lorsque la charge est faible.
- $C_r = c^{te}$. Exemple : cas d'un frottement sec, avec $C_r = C_f$.
- $C_r = f.\Omega$. Exemple : cas d'un frottement visqueux (cf §C31).



⚠ Lorsque $C_r = c^{te}$, le moteur ne démarre qu'à partir d'une certaine tension U_0, appelée *tension de seuil de démarrage*. C'est notamment le cas avec un frottement sec. On a alors : $U_0 = \dfrac{RC_f}{K}$.

• *Fonctionnement dynamique : fonctions de transfert en boucle ouverte (commande de vitesse)*

- *Fonctionnement avec :* $C_r = 0$

$$\left.\begin{array}{r} U = K\Omega + R\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = Jp\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow U = K\Omega + \frac{RJ}{K}p\Omega \Rightarrow H_M(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{\dfrac{1}{K}}{1 + \dfrac{RJ}{K^2}p} = \frac{H_0}{1+\tau p}$$

$$U \longrightarrow \boxed{\frac{H_0}{1+\tau p}} \longrightarrow \Omega \qquad \text{avec } \tau = \frac{R.J}{K^2}$$

⚠ Pour éviter toute confusion, le gain statique, qui vaut $1/K$, est noté ici H_0.

- *Fonctionnement avec :* $C_r = c^{te} = C_f$

$$\left.\begin{array}{r} U = K\Omega + R\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = Jp\Omega + C_f \end{array}\right\} \Rightarrow U = K\Omega + \frac{RJ}{K}p\Omega + \underbrace{\frac{RC_f}{K}}_{U_0}$$

Ici le fonctionnement n'est pas linéaire, puisque le moteur ne démarre qu'à partir de $U = U_0$. Si l'on se limite au cas où le moteur tourne réellement, on est amené à poser $U' = U - U_0$, en ignorant la plage de réglage $0 < U < U_0$ où le moteur est encore à l'arrêt. D'où la fonction de transfert :

$$H'_M(p) = \frac{\Omega}{U'} = \frac{\dfrac{1}{K}}{1 + \dfrac{RJ}{K^2}p} = \frac{H_0}{1+\tau p}$$

$$U' \longrightarrow \boxed{\frac{H_0}{1+\tau p}} \longrightarrow \Omega$$

- *Fonctionnement avec :* $C_f = f.\Omega$

$$\left.\begin{array}{r} U = K\Omega + R\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = (Jp + f)\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow U = K\Omega + \frac{RJ}{K}p\Omega + \frac{Rf}{K}\Omega \Rightarrow H_M(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{\dfrac{1}{aK}}{1 + \dfrac{1}{a}\dfrac{RJ}{K^2}p} \text{ avec } a = 1 + \frac{Rf}{K^2}$$

- *Fonctionnement avec inductance de lissage*

Dans le cas général, on ne peut négliger l'influence de la bobine sur le comportement de la machine. Soit $L = l_{\text{lissage}} + l_{\text{bobine}}$. On obtient une fonction de transfert du second ordre, qui dépend bien sûr de la charge. Exemple avec $C_r = 0$:

$$\left.\begin{array}{l} U = K\Omega + (R+Lp)\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = Jp\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow U = K\Omega + \frac{RJ}{K}p\Omega + \frac{LJ}{K}p^2\Omega \quad \Rightarrow H_M(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{\dfrac{1}{K}}{1 + \dfrac{R.J}{K^2}p + \dfrac{L.J}{K^2}p^2}$$

Par identification avec la fonction de transfert principale du second ordre (cf §A14), on trouve :

$$H_M(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{H_0}{1 + 2m\tau_0 p + \tau_0^2 p^2} \text{ avec } H_0 = \frac{1}{K}, \quad \tau_0 = \frac{\sqrt{LJ}}{K} \text{ et } m = \frac{R}{2K}\sqrt{\frac{J}{L}}$$

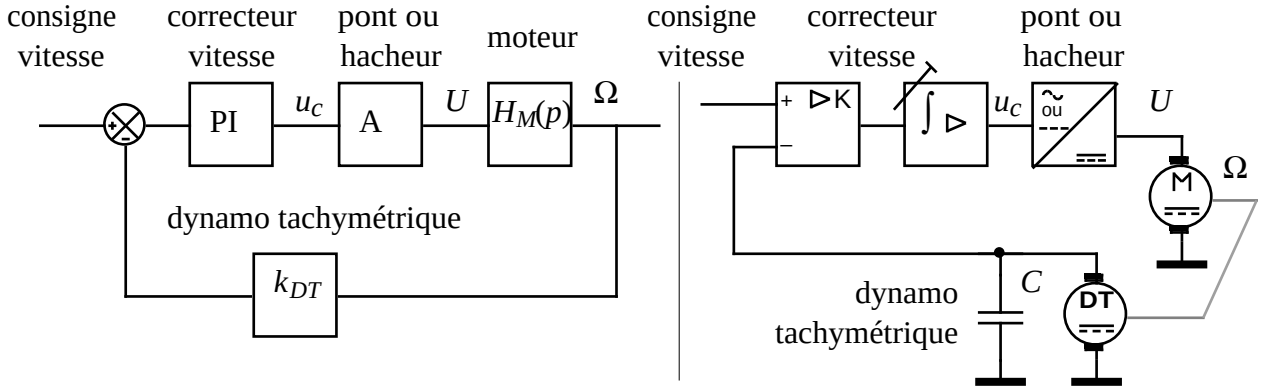
En général l'amortissement m est >> 1. On peut alors décomposer la fonction du 2ème ordre en un produit de deux fonctions du 1er ordre (cf §A14) :

$$H_M(p) = \frac{H_0}{(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)} \text{ avec } \begin{cases} \tau_1 = \tau_0\left(m + \sqrt{m^2-1}\right) \approx 2m\tau_0 = \dfrac{R.J}{K^2} & \text{c}^{\text{te}} \text{ de temps mécanique} \\ \tau_2 = \dfrac{\tau_0}{\left(m + \sqrt{m^2-1}\right)} \approx \dfrac{\tau_0}{2m} = \dfrac{L}{R} & \text{c}^{\text{te}} \text{ de temps électrique} \end{cases}$$

La c^{te} de temps électrique τ_2 est plus faible que la c^{te} de temps mécanique τ_1. Quand L est petite, τ_2 devient négligeable devant τ_1, ce qui ramène au 1er ordre précédent.

• Fonctionnement dynamique : fonction de transfert en boucle fermée (régulation de vitesse)

De ce qui précède on déduit le schéma d'une régulation de vitesse sur machine CC (cf le cours de régulation pour l'étude du système en boucle fermée). Exemple avec une dynamo tachymétrique (cf §C31) :



Contrôle de couple (et de courant) : $U \to C_m$ (ou I)

Une solution évidente pour contrôler le couple serait d'alimenter le moteur à l'aide d'un générateur de courant (variable), puisque $C_m = KI$. Mais la solution technique la plus courante consiste à réaliser une régulation de couple avec U pour paramètre de commande.

Du point de vue statique, la caractéristique mécanique $C_m = -\dfrac{K^2}{R}.\Omega + \dfrac{K}{R}.U$ montre que la relation $C_m(U)$ est une droite paramétrée par Ω.

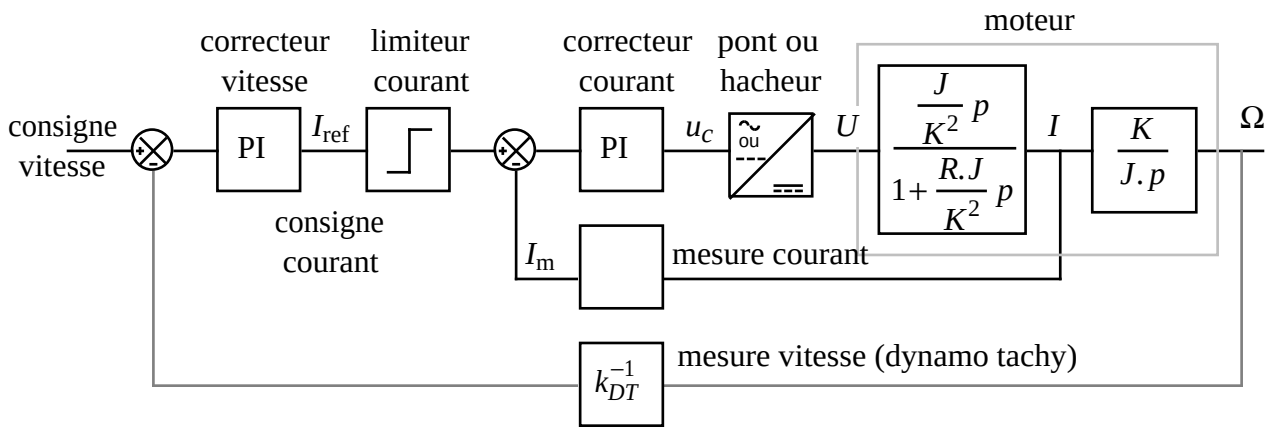
Du point de vue dynamique, la fonction de transfert s'écrit :

$$\left.\begin{array}{l} U = K.\Omega + R.\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = J.p.\Omega \end{array}\right\} \Rightarrow U = K.\frac{C_m}{J.p} + R.\frac{C_m}{K} \quad \Rightarrow \frac{C_m}{U} = \frac{\frac{J}{K}p}{1+\frac{R.J}{K^2}p} \text{ ou encore : } \frac{I}{U} = \frac{\frac{J}{K^2}p}{1+\frac{R.J}{K^2}p}$$

Cette dernière relation équivaut à contrôler le courant d'induit.

Régulation cascade $U \to \Omega$ et I

De ce qui précède on déduit le schéma complet de contrôle d'un moteur CC, à l'aide d'une régulation cascade incluant deux fonctions de transfert : $H(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{\Omega}{I}.\frac{I}{U}$. Comme la constante de temps électrique est plus faible que la constante de temps mécanique, la boucle interne (qui doit être la plus rapide : cf cours de régulation) contrôle le courant, la boucle externe controlant la vitesse. On aboutit au schéma suivant (voir aussi schéma §C26) :



Le limiteur de courant empêche qu'au démarrage l'appel de courant ne soit trop important. La mesure de courant est effectuée à l'aide d'un shunt ou d'une sonde à effet Hall (cf §C31).

Commande d'axe : $U \to \theta$

Principe : un réducteur de vitesse de rapport $n = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} >> 1$ (réducteur : cf §C31) est installé sur l'arbre moteur et permet de contrôler la position de l'arbre de sortie.

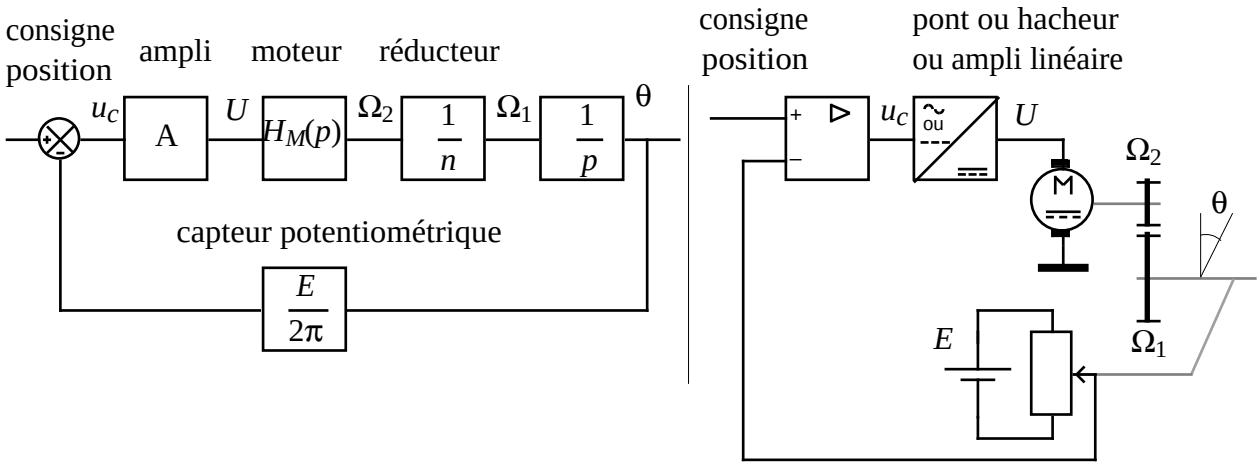
• *Fonctionnement dynamique en boucle ouverte (commande de vitesse)*

La vitesse étant la dérivée de la position angulaire (cf §C31 : $\Omega = d\theta/dt$), cela entraîne l'introduction d'une intégration pure ($\theta = \int \Omega dt$) dans la fonction de transfert en boucle ouverte du moteur. En négligeant les couples de frottements, il vient :

$$\left.\begin{array}{l} U = K\Omega_2 + R\dfrac{C_m}{K} \\ C_m = Jp\Omega_2 \\ \Omega_2 = n\Omega_1 \\ \Omega_1 = p\theta \end{array}\right\} \Rightarrow U = Knp\theta + \frac{R.J}{K}np^2\theta \quad \Rightarrow \quad \frac{\theta}{U} = \frac{1}{np}\frac{\frac{1}{K}}{1+\frac{R.J}{K^2}p} = \frac{1}{np}H_M(p)$$

• *Fonctionnement dynamique en boucle fermée (asservissement de position)*

Bien que ce ne soit pas la méthode la plus performante, le principe de cet asservissement est illustré simplement à l'aide d'un capteur de position potentiométrique (cf §C31) :

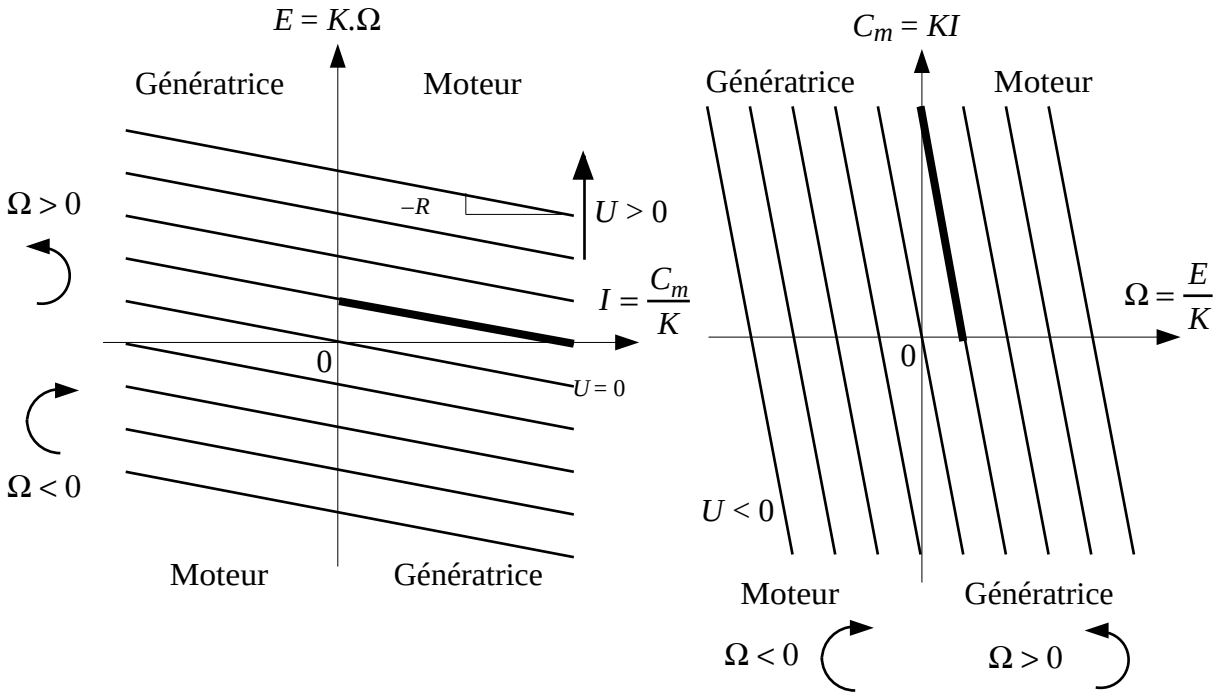


A priori, la présence du facteur $1/p$ dispense de l'insertion d'un correcteur PI dans la boucle : l'erreur statique de position est normalement nulle. Cependant, certains facteurs infirment ce résultat théorique, et rendent nécessaire l'adjonction du correcteur :

- présence de frottement sec : la transmittance du moteur n'est pas $H(p)$, mais $H'(p)$.
- présence de jeu dans les engrenages du réducteur
- défaut de précision du capteur

MCC en fonctionnement réversible - génératrice à courant continu ("dynamo")

Les caractéristiques statiques se déduisent de l'équation (1), étendue aux 4 quadrants : les variables U, I, E, Ω sont algébriques. En conservant la convention récepteur :



* **COMPLEMENTS** *

- ***Remarque à propos de la fonction de transfert du moteur CC***

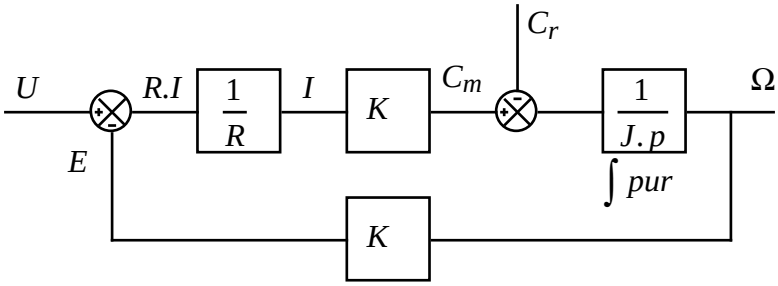
On peut établir pour ce moteur le schéma fonctionnel en boucle fermée suivant :

U : consigne $\quad \boldsymbol{U} = E + R.I \Rightarrow R.I = \boldsymbol{U} - \boldsymbol{E}$ $\quad$ E : mesure

$\boldsymbol{E} = K.\boldsymbol{\Omega}$ $\quad$ $\boldsymbol{\Omega}$: grandeur de sortie

$C_m = K.I$

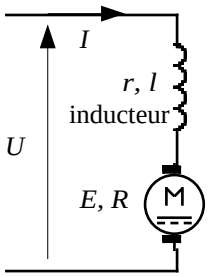
$C_m = J.p.\boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{C_r}$ $\quad$ C_r : perturbation



Intuitivement, la possibilité de modéliser cette machine en boucle fermée montre que celle-ci se comporte, en dehors de tout système additionnel, comme un régulateur de vitesse : $\boldsymbol{\Omega} = c^{te}\ \forall\ C_r$, propriété que l'on vérifie à l'examen de la caractéristique mécanique statique du moteur : celle-ci, très pentue, montre que la vitesse ne varie que faiblement pour une grand variation de couple. C'est cette propriété, associée au fait que la vitesse est réglable sur une grande plage de variation, qui fait tout l'intérêt de ce type de machine.

- ***Moteur série***

- Equations



$$U = E + (R + r)I$$

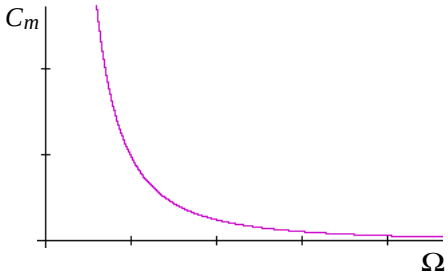
$$E = k\Phi\Omega$$

$$\Phi = l.I$$

(en supposant le circuit magnétique non saturé)

$$C_m = \frac{EI}{\Omega} = k.l.I^2$$

$$C_m = J\frac{d\Omega}{dt} + C_r$$



- Caractéristique mécanique statique

En négligeant les chutes de tension dans l'inducteur et l'induit, soit $(R+r)I \ll U$, il vient : $C_m = \dfrac{U^2}{k.l.\Omega^2}$.

Le couple est très important à faible vitesse (au démarrage) : le moteur série est surtout employé en traction dans le domaine des très fortes puissances (> 1 MW). Mais sous la tension nominale, il ne peut fonctionner à faible charge (a fortiori à vide) car la vitesse devient infinie (risque de destruction du moteur) !

- ***Moteur universel***

Dans le moteur série, le sens du couple ne dépend pas du sens du courant (à cause de l'élévation de I au carré). En théorie, ce moteur peut donc fonctionner avec un courant alternatif. Toutefois si l'on ne prend pas certaines précautions (feuilletage du circuit magnétique, comme dans un transformateur), le moteur chauffe exagérément à cause des courants de Foucault induits dans le fer (cf §C31).

Par contre, si le circuit magnétique est feuilleté, le moteur ainsi conçu, appelé "moteur universel", peut fonctionner aussi bien en continu qu'en alternatif. C'est ce type de moteur que l'on rencontre dans l'appareillage grand public (machines à laver, aspirateur, etc...), où il fonctionne avec une tension monophasée alternative (240 Veff).