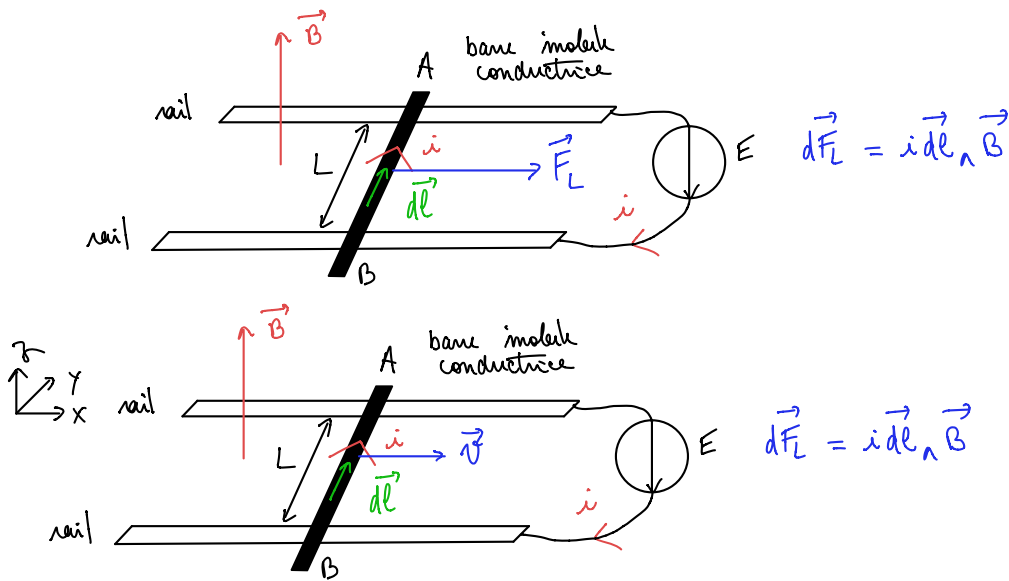


1.

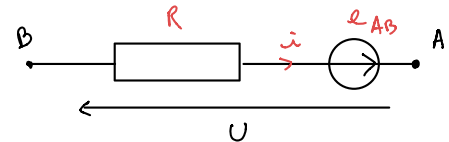
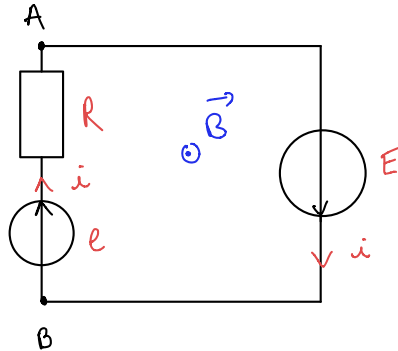
I



⚠ les conventions sont importantes

ici $\vec{E}_m$ va de A vers B

L.



équation mécanique

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_L = i \vec{BA} \wedge \vec{B} = i l B \vec{u}_x \quad (\text{pas de frottement})$$

équation électrique

$$E + e - Ri = 0 \quad \text{avec} \quad e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{BA} = -vBl < 0 \quad \text{ici}$$

L.

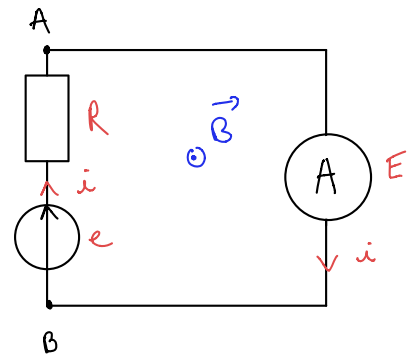
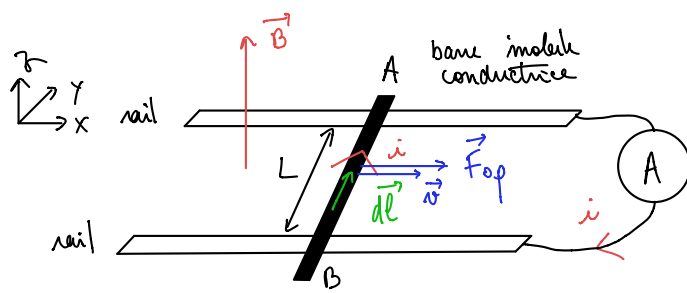
$$m \frac{dv}{dt} = Bl \left(\frac{E - vBl}{R} \right) \quad \text{ordre 1}$$

$$\dot{v} + \frac{v}{\tau} = \frac{v_\infty}{\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{R \cdot m}{B^2 l^2}$$

$$v(t) = v_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad v_\infty = \frac{E}{Bl}$$

idem

$$i(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$



ici,
$$e = \int_B^A \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{BA} = -vBL < 0 \text{ ici}$$
 comme tout - à - l'heure

donc
$$i = \frac{e}{R} = -\frac{vBL}{R} < 0$$
 et $\vec{F}_{\text{Laplace}}$ contraire à $\vec{F}_{\text{op}}$
mais $\vec{B}_{\text{induit}} \parallel \vec{B}$!!!

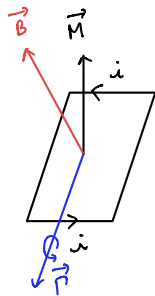
Cas générateur

3.

$$P_e = eAB \cdot i = (-vBL) \cdot \left(-\frac{vBL}{R}\right) = \frac{(vBL)^2}{R} > 0$$

$$P_L = \vec{F}_{\text{Laplace}} \cdot \vec{v} = (i \vec{BA} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = -\frac{vBL}{R} vBL = -P_{\text{électrique}}$$

↑
orienté selon i



$$\vec{M} = i \vec{S}$$

II.

Equations de la MCC

des données sont ϕ et Ω imposés par l'opérateur.
Les inconnues sont $I_R, \Omega, \Gamma, E, \dots$

On suppose $\vec{B} = B_s \vec{u}_x$ fixe et on considère 1 spire

• Couple électromagnétique

Sans collecteur, $\Gamma = \vec{\mu} \times \vec{B} \Big|_z = I S B_s \cos \Omega t = \phi_s I \cos \Omega t \rightarrow \langle \Gamma \rangle = 0$
Avec collecteur, $\Gamma = \phi_s I \cdot |\cos \Omega t| \rightarrow \langle \Gamma \rangle = \frac{2}{\pi} \cdot \phi_s I$

• Force électromotrice

Sans collecteur, $e(t) = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi}{dt} = \dots = - \phi_s \Omega \cos(\Omega t) \rightarrow \langle e \rangle = 0$
Avec collecteur, $e(t) = \dots = - \phi_s \Omega |\cos(\Omega t)| \rightarrow \langle e \rangle = - \frac{2}{\pi} \phi_s \Omega$

Relation fondamentale de la conversion de puissance électromécanique

$$\langle \Gamma \Omega \rangle + \langle e I \rangle = 0 \quad \text{♥ (sans pertes)}$$

Généralement, équations de la MCC :

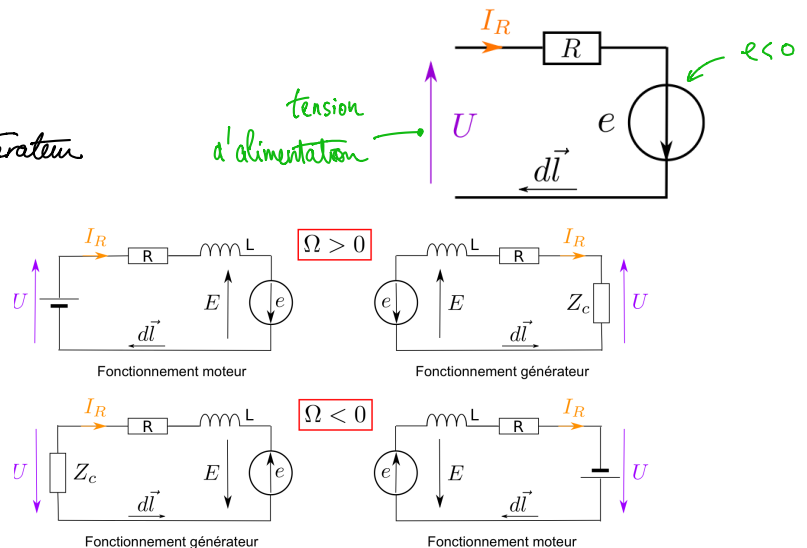
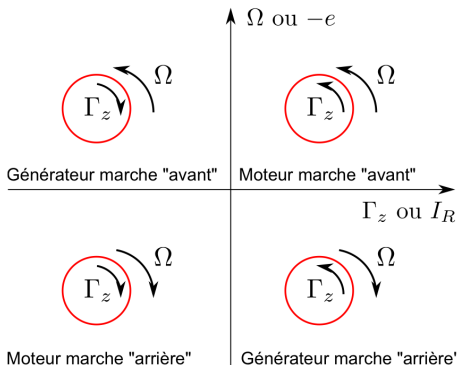
équation électrique $u(t) = K \phi_s \Omega(t) + R i_R(t) + L \frac{di_R}{dt}$
équation mécanique $J \frac{d\Omega}{dt} = K \phi_s i_R(t) - \Gamma_R(\Omega) - \Gamma_f$

$U = K \phi_s \Omega + R I_R$
 $\Gamma = K \phi_s I_R - \Gamma_f$
K: constante de couplage électromécanique
exercice pour le reste du circuit
-e force contre électromotrice
exercice d'inductance Γ_{EN} frottement

NB : • l'induit est parcouru par un courant I_R
donc génère un champ $\vec{B}_R$ opposé à $\vec{B}_s$
→ réaction magnétique de l'induit, compensée par un autre bobinage
• la f.e.m $E = -e$ réduit le courant appelé dans l'induit : $I_R = \frac{U - E}{R}$ donc
si $\Omega \uparrow$, $e \uparrow$, $I_R \downarrow$ donc $\Gamma \downarrow$. Système en contre-réaction.
↳ Flapace

Modes de fonctionnement

Machine réversible : mode moteur / mode générateur



• $P_{\text{regu}} = E I_R > 0$ consommation d'énergie électrique → récepteur
" " < 0 production " → générateur
• $\vec{\Gamma} \cdot \vec{\Omega} > 0$ moteur
" " < 0 freinage

$I_R > 0$ et $E > 0$
sur les schémas

Bilan de puissance

(i) Fonctionnement moteur

On fournit $P_{\text{elec}} = \underbrace{U_s I_s}_{\text{inducteur}} + \underbrace{U_R I_R}_{\text{induit}}$

On perd :
 - $U_s I_s = R_s I_s^2$ dissipe P_{Fer} $P_{\text{commutation}}$ $P_{\text{frottement}}$
 sous forme de chaleur $\underbrace{\text{intégralement par effet Joule dans l'inducteur}}_{\text{pertes "cuivre"}}$ $\underbrace{\text{hystérésis + courants de Foucault}}$ $\underbrace{\text{variations brutales de } I}_{\text{variations brutales de } I}$ $\propto \Omega$ $\underbrace{\text{contact des balais et liaison rotor-bâti}}$

la puissance utile est : $P_u = \vec{\Gamma}_m \cdot \vec{\Omega}$ Machine réelle, $\eta = \frac{P_u}{P_{\text{elec}}^{\text{ext}}} \sim 80-95\%$
 contre $\eta_{\text{th}} \sim 30-40\%$ centrale thermique.

(ii) Fonctionnement générateur

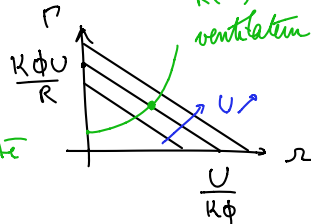
On fournit $P_{\text{mech}} = \vec{\Gamma}_m \cdot \vec{\Omega} > 0$. Les pertes sont les mêmes. On récupère $P_{\text{elec}} = U_R I_R$

Caractéristique du moteur

- C'est la courbe $\Gamma_{\text{EM}}(\Omega)$ qu'il faut intersecter avec $\Gamma_R(\Omega)$ couple résistif de la charge. pour trouver le point de fonctionnement : à l'équilibre, le couple moteur compense le couple résistif exercé par la charge.
- $\Gamma_{\text{EM}} = K\phi I_R = K\phi \frac{U-E}{R}$

$$\Gamma_{\text{EM}} = \frac{K\phi}{R} (U - K\phi\Omega)$$

peu négative $\rightarrow$ stabilité



on contrôle Ω avec la tension U

Démarrage

- Au démarrage $\Omega = 0$ donc $E = 0$. Or $I_R = \frac{U-E}{R} = \frac{U}{R}$ $\leftarrow$ le courant appelé est grand si U grand $\rightarrow$ il faut augmenter graduellement U pour ne pas appeler un courant qui endommagerait la machine $\leftarrow$ petit
- De plus, pour démarrer il faut $U > U_0 = \frac{R \Gamma_c(\Omega=0)}{K\phi}$ pour vaincre le couple résistif $\leftarrow$ rampe de tension ou thermostat dont on diminue la résistance après démarrage

Eteindre l'inducteur en dernier

En charge et régime stable, $\Omega = \text{cte}$ et $\Gamma = -\Gamma_{\text{résistif}}^{\text{charge}}$ donc la caractéristique $\Gamma(\Omega)$ s'inverse en : $\Omega = \frac{1}{K\phi} \left(U - \frac{R\Gamma}{K\phi} \right)$ donc si on éteint l'inducteur, $\phi \rightarrow 0$ et $\Omega \rightarrow \infty$, le moteur s'emballe.

Temps de réponse et régime transitoire

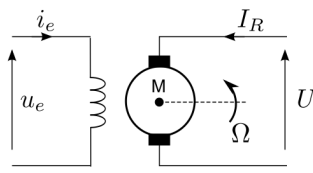
équation électrique $u(t) = L \frac{di_R(t)}{dt} + R i_R(t) + K\phi\Omega(t)$ $\rightarrow$ temps de réponse électrique : $\tau_e = \frac{L}{R}$

équation mécanique $J \frac{d\Omega}{dt} = K\phi i_R(t) - \Gamma_c(\Omega) - \frac{d\Omega}{\alpha}$ $\rightarrow$ temps de réponse mécanique $\tau_m = \frac{J}{\alpha}$

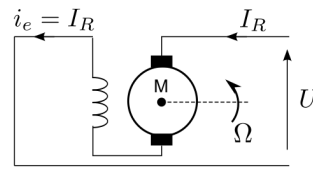
combinaison 2 para-bas d'ordre 1 $\rightarrow$ para-bas d'ordre 2

Modes d'excitation

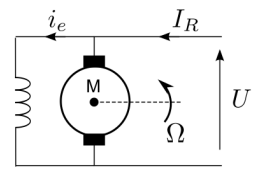
- * séparée
- * série
- * parallèle (moteur shunt)
moins utilisée



Machine à excitation indépendante



Machine à excitation série



Machine à excitation parallèle (shunt)

Le mode d'excitation change :
 * couple au démarrage
 * la stabilité de la rotation

Excitation série : $I_R = I_s$ donc $\Phi \propto I_R$

$$\begin{aligned} E &= K' \Omega I_R \\ \Gamma &= K' I_R^2 \end{aligned} \quad \text{si } (R_s + R_R) I_R \ll E \quad E \approx U \quad \Gamma = \frac{U^2}{K' \Omega^2}$$

- * $\Gamma \propto \frac{1}{\Omega^2} \rightarrow$ couple important à faible vitesse utile pour les démarrages automobiles, les laminaires, les tractions } applications de puissance

* Au démarrage, il faut un rhéostat sinon $I_R = \frac{U}{R_s + R_R}$ courant appelé destructeur.

* Pas de fonctionnement à vide $\Gamma = 0 \rightarrow \Omega \rightarrow \infty$. $R_s + R_R$ petit

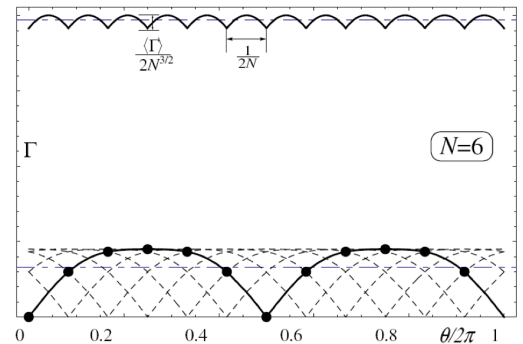
* **Moteur universel** : moteur en excitation série pouvant être alimenté en continu ou alternatif.

Excitation parallèle : $U_R = U_s = U \rightarrow \Phi \propto U$, le stator appelle toujours le courant $i_s = \frac{U}{R_s}$

- * on règle la vitesse en réglant simplement R_e avec un rhéostat dans le circuit statorique
- * à U constant, Ω est indépendant de la charge car $U \approx E = K \Phi \Omega = K' U \Omega \rightarrow \Omega = \frac{K}{K' U}$
 ↳ application dans les machines outils qui attaquent la pièce à usiner.

Montage à N spires

En disposant N spires déphasées de $\frac{2\pi}{N}$ spatialement, on passe d'un couple en $|\cos(\alpha t)|$ en un couple plus constant.



Bobinages réalistes

Pour $2N$ conducteurs actifs i.e. N spires

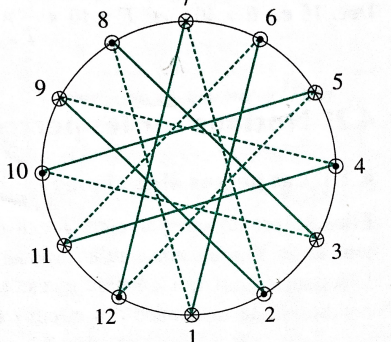
$2p$ pôles (en étoile)

$2a$ voies d'enroulement $\rightarrow \frac{N}{2a}$ spires en série dans une voie, réparties à angles réguliers

$$K' \approx \frac{N}{\pi} \frac{p}{a}$$

les $2a$ voies sont en parallèle :

$$\begin{cases} \ell = \ell_{\text{voie}} \propto \frac{N}{2a} \\ i_{\text{voie}} = \frac{I_R}{2a} \text{ plus petit} \end{cases}$$



Bobinage ($N=6$)

les conducteurs ne passent pas par le centre