

Module AU318 Mécatronique « Actionneurs et gestion de l'énergie »

2020-2021



J.M. VINASSA

Enseignement : jvinassa@enseirb-matmeca.fr

Recherche : jean-michel.vinassa@ims-bordeaux.fr

- /01/ Grandeurs électriques utiles, définition de l'actionneur, plan mécanique couple-vitesse, transmission mécanique
- /02/ Généralités sur les machines électriques tournantes, champ tournant, classification, électromagnétisme, aimants permanents
- /03/ Machine à courant continu, constitution, principe de fonctionnement, modèle, technologie
- /04/ Moteur pas à pas, propriétés génériques, exemples
- /05/ Machine synchrone à aimants, principe, alimentation et autopilotage
- /06/ Compléments
- /07/ Introduction à la conversion statique

Régime continu ou quasi-continu avec ondulation périodique

Valeur moyenne $\bar{x} \text{ ou } \langle x \rangle = \frac{1}{T} \int_0^\infty x(t) dt$

Régime sinusoïdal

Valeur efficace $X = \left(\frac{1}{T} \int_0^\infty x^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}$

Régime quelconque périodique

Décomposition en série de Fourier d'un signal $x(t)$, T périodique

$$x(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t) \quad \text{ou bien} \quad x(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k \sqrt{2} \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

$$X_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos k\omega t dt$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin k\omega t dt$$

$$X_k = \sqrt{\frac{A_k^2 + B_k^2}{2}}$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \frac{A_k}{B_k}$$

$\omega = 2\pi f$ pulsation du fondamental, k rang de l'harmonique, X_k valeur efficace, φ_k déphasage

Caractéristiques de la grandeur sinusoïdale x :

amplitude X_m (ou \hat{x} , X_p), phase $\omega t + \varphi_x$, phase à l'origine φ_x , sa valeur efficace est $X = \frac{X_m}{\sqrt{2}}$

Principe de la correspondance expression temporelle / amplitude complexe

Grandeur instantanée → Grandeur complexe → Phaseur (Fresnel-complexe)

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi_x) \quad \underline{x} = X_m e^{j(\omega t + \varphi_x)} = X \sqrt{2} e^{j\omega t} e^{j\varphi_x} \quad \underline{X} = X e^{j\varphi_x}$$

$$\begin{matrix} \swarrow & & \searrow \\ \swarrow & \underline{x} = X_m e^{j(\omega t + \varphi_x)} & \searrow \\ x(t) = Re(\sqrt{2} e^{j\omega t} \underline{X}) & & \end{matrix}$$

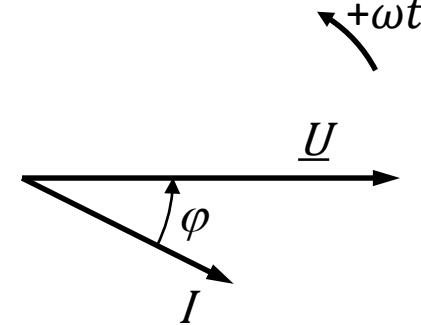
Représentation vectorielle dans le plan de Fresnel-complexe

Plan de Fresnel: vecteurs, angles orientés

Plan complexe: module, argument → Représentation hybride Fresnel-complexe

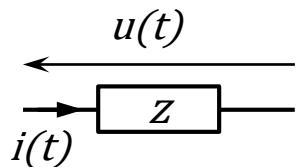
Déphasage du courant / tension $\varphi = \varphi_u - \varphi_i L$

En prenant la tension comme origine des phases ($\varphi_u = 0$)



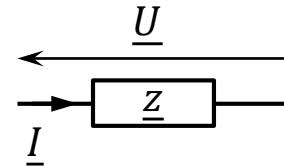
Application à la tension et au courant d'un dipôle linéaire (impédance Z)

$$\begin{cases} u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_u) \\ i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_i) \end{cases}$$



Impédance complexe (résistance, réactance)

$$\underline{Z} = R + jX$$

Déphasage du courant / tension $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ Avec tension comme origine des phases ($\varphi_u = 0, \varphi = -\varphi_i$)

$$\begin{cases} u(t) = U_m \cos(\omega t) \\ i(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{U} = U \\ \underline{I} = I e^{-j\varphi} \end{cases} \rightarrow \underline{Z} = Z e^{+j\varphi}$$

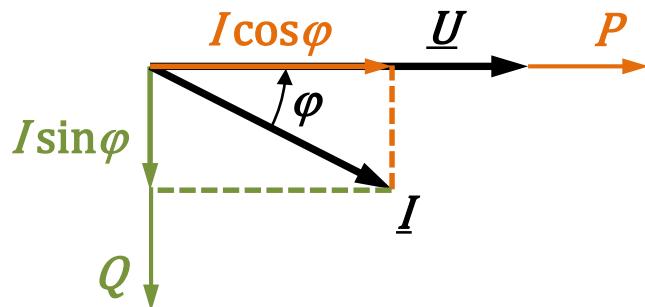
Représentation dans le plan Fresnel-complexe

 \underline{U} suivant Ox (origine des phases)

Déphasage positif du courant par rapport à la tension

 I est en retard / tension (comportement inductif)Angle $\varphi > 0, \cos \varphi$ est dit « arrière » (AR)

Mise en évidence des axes des puissances



Puissance instantanée $p(t) = u(t) i(t)$ [W]

Puissance active $P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$ [W]

en régime sinusoïdal :

$$p(t) = (U_m \cos \omega t) (I_m \cos(\omega t - \varphi)) = U I \cos \varphi + U I \cos(2\omega t + \varphi)$$

↑

donc $P = U I \cos \varphi$ [W] puissance fluctuante

Puissance apparente $S = UI$ [VA] toujours $S \geq P$

Facteur de puissance $F_P = \frac{P}{S}$ en régime sinusoïdal, $F_P = \cos \varphi$

Puissance réactive $Q = U I \sin \varphi$ [VAR]

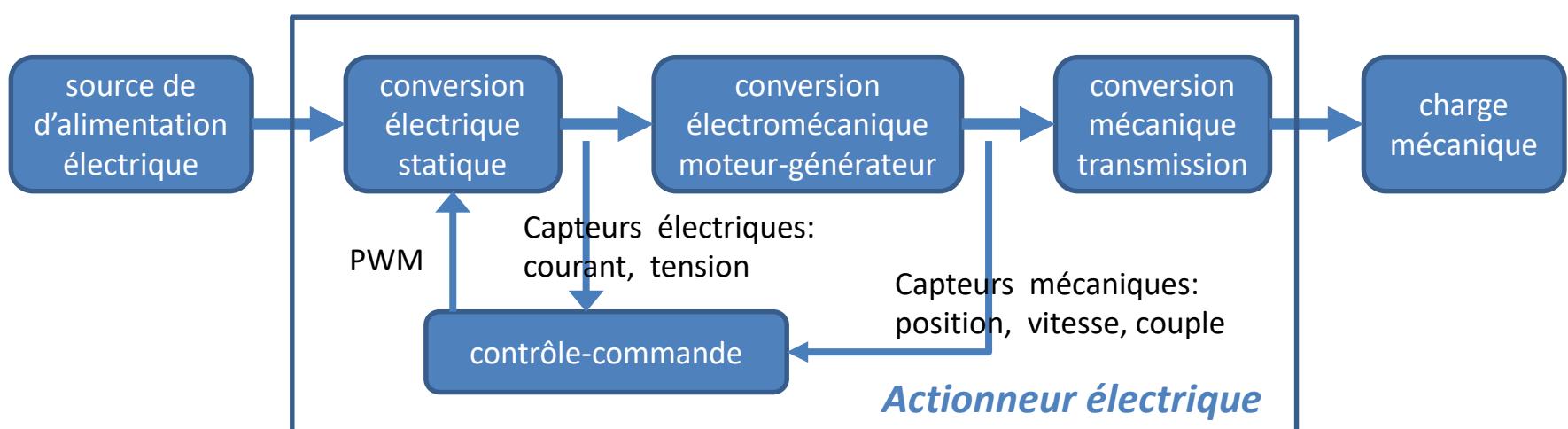
$$\text{en sinusoïdal : } S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}$$

Puissance apparente complexe $\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ$ soit $P = \operatorname{Re}(\underline{S})$, $Q = \operatorname{Im}(\underline{S})$, $S = |\underline{S}|$

La puissance active P (forme tangible d'un travail ie. chaleur, conversion électromécanique) est facturée par EDF qui met en œuvre une installation dimensionnée par la puissance apparente S . La valeur du facteur de puissance est donc limitée (environ 0,9), ce qui peut conduire à devoir relever le $\cos \varphi$ (ajout de condensateurs compensant le trop de puissance réactive Q consommée).

Actionneur électrique ?

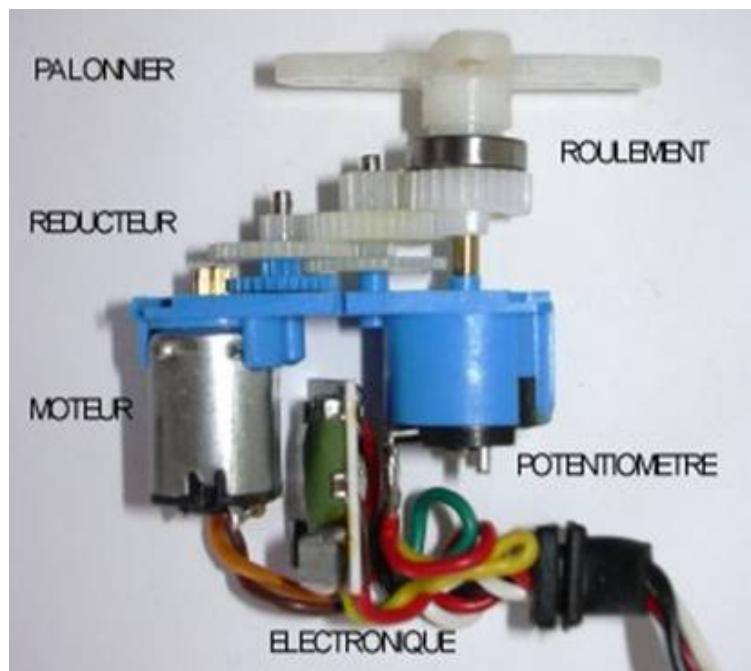
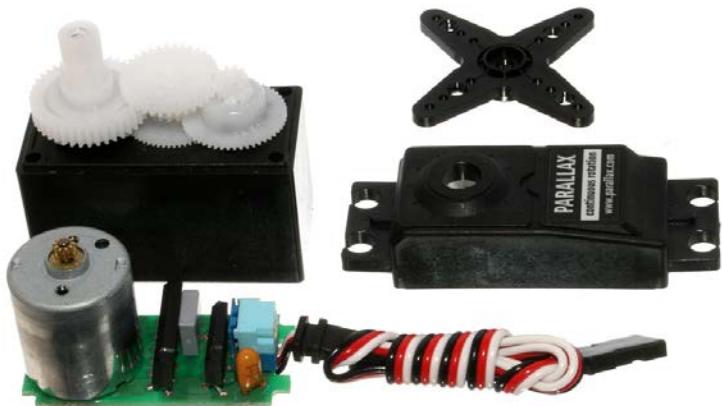
- Batterie U_{DC}
 - réversible en /
 - portabilité
 - Réseau redressé conversion AC /DC
 - non réversible
 - non portable
 - Conversion DC/DC hacheur
 - non réversible
 - réversible
 - Conversion DC/AC onduleur
- Machine tournante
- à collecteur MCC
 - sans balais
 - synchrone
 - pas à pas
- Réducteur Ω_m/Ω_c
 - engrenages
 - courroie
 - Conversion rotation / translation
 - crémaillère
 - vis sans fin
- Passive ou entraînée
 - Active, pouvant être entraînante



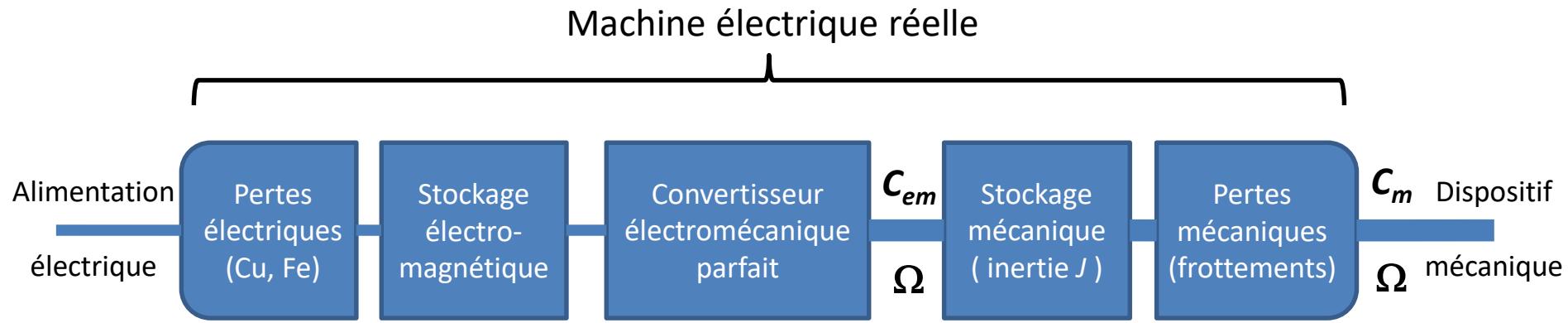
Le contrôle commande assure l'asservissement d'une grandeur mécanique (variateur de vitesse) par une action sur les grandeurs électriques (e.g. Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI))

Il doit gérer la mise en marche, l'arrêt et la protection / sécurité

Servomoteurs et motovariateurs



Machine: terme générique pour moteur et génératrice



Machine idéale + pertes reportées sur alimentation et charge

Principe fondamental de la dynamique en translation

$$\sum \vec{F} = M \cdot \vec{\gamma}$$

avec $\gamma = \dot{v} = \ddot{x}$ expression de la puissance $P = F \cdot v$

Dans le cas d'un actionneur électrique, même pour un besoin en translation, on utilisera très majoritairement une machine tournante



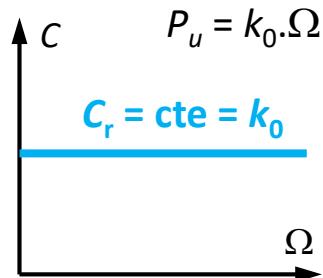
Principe fondamental de la dynamique en rotation

$$\sum \vec{C} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r$$

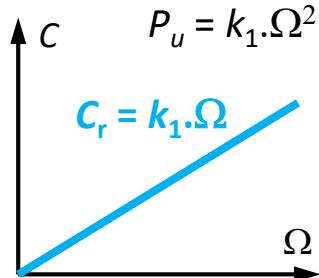
avec $\gamma = \dot{\Omega} = \ddot{\theta}$ expression de la puissance $P = C \cdot \Omega$

Le besoin en entraînement se définira donc dans le plan mécanique couple-vitesse où on représentera le couple moteur C_m et le couple résistant C_r

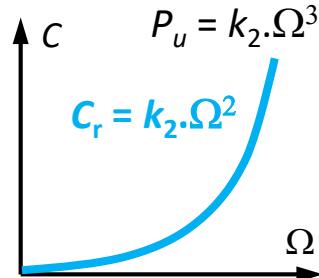
- Caractéristique de la charge mécanique $C_r(\Omega)$



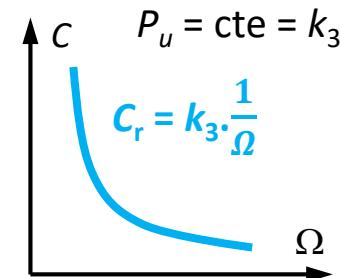
frottement sec
manutention
horizontale,
verticale, levage,
pompage



frottement visqueux
pompes
volumétriques,
réducteur,
génératrice sur R

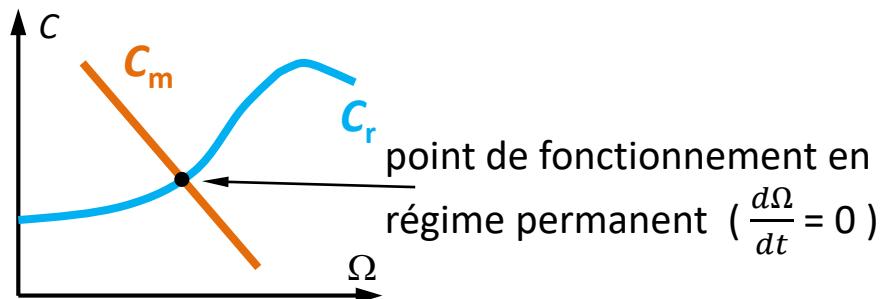


frottement visqueux
ventilateur,
mélangeur



puissance constante
machine outils,
enrouleuse,
compresseur chargé
traction électrique

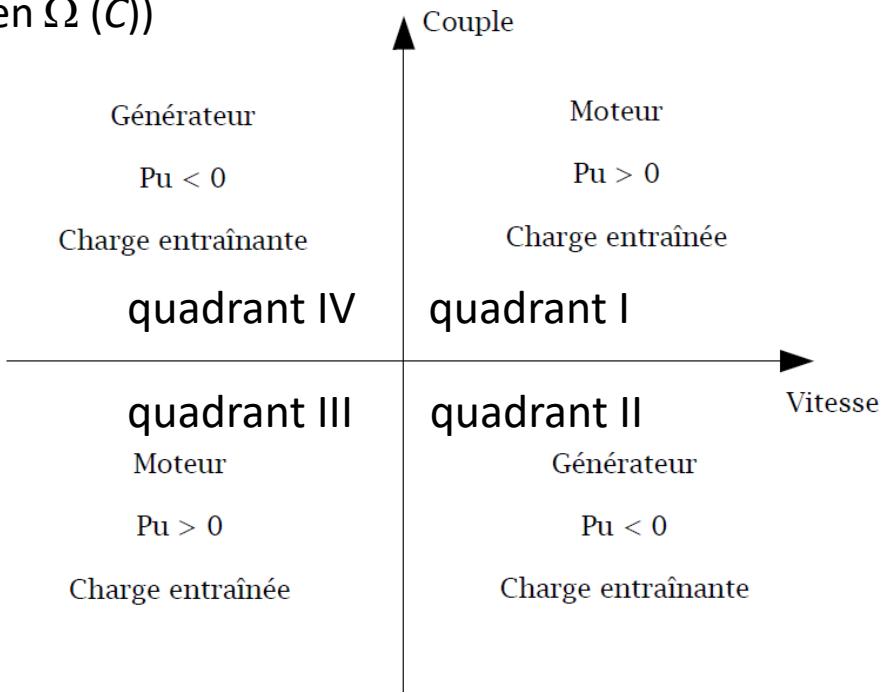
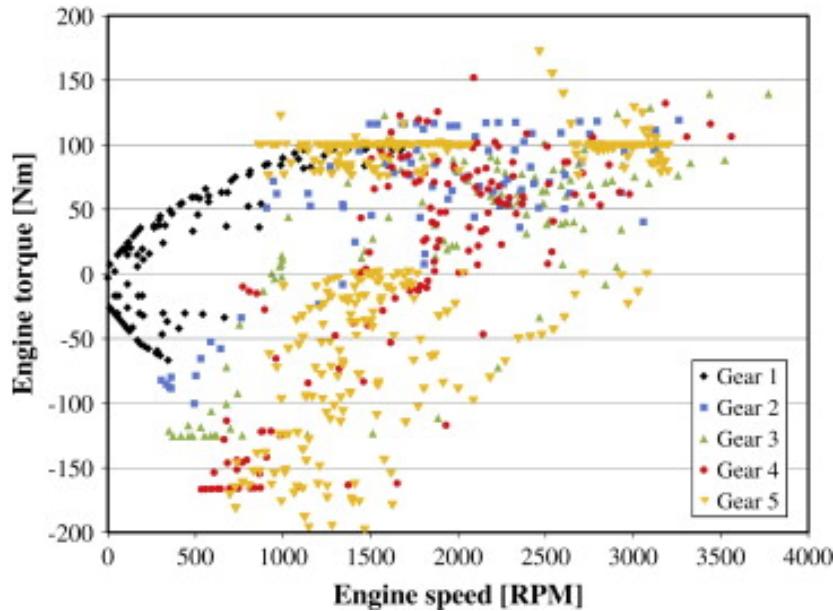
- Introduction du couple de la machine tournante $C_m(\Omega)$



Limites dans le plan $C(\Omega)$

- Stabilité du point de fct (pente de $C_r >$ pente C_m)
- Existence de C_{max} , Ω_{max} , P_{max}

- Propriétés des quadrants dans $C(\Omega)$ (ou bien $\Omega(C)$)



- Nombre et type de quadrants en fonction de l'application

- Q I : perceuse à variateur, aspirateur, pompage, ventilation
- Q II : éolien, génération embarquée transport
- Q I + Q III : visseuse-dévisseuse, lève vitre, volets roulants, enrouleur-dérouleur
- Q I + Q IV : treuil, levage, pompage-turbinage
- Q I + Q II : traction électrique, laminoir dérouleusse
- 4Q : traction (freinage récupératif) et **robotique**

- Propriétés des réducteurs mécaniques (rotation)

Diviseur de vitesse, multiplicateur de couple → conservation de la puissance

$$\Omega_{\text{entrée}} = K_{\text{red}} \cdot \Omega_{\text{sortie}} \quad (K_{\text{red}} \text{ généralement } >1)$$

$$C_{\text{entrée}} = (1/K_{\text{red}}) \cdot C_{\text{sortie}}$$

Bonne réversibilité pour des rapports faibles

Ondulations de couple ramenées: multipliées par K

Inertie ramenée: multipliée par K²

- Exemples de transmission avec réduction



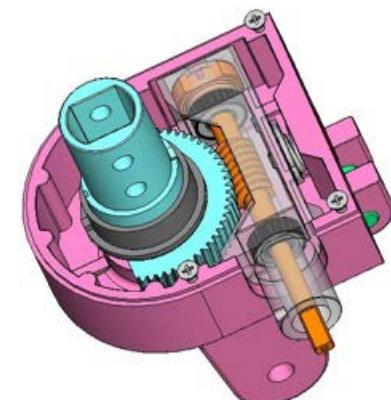
Engrenage à 2 étages



à planétaires



à crémaillère (conversion rotation-translation)



à vis sans fin

- Constitution
 - Partie mobile rotor (peut être intérieur ou extérieur)
 - Partie fixe stator
 - Entrefer (mécanique, magnétique)
 - Inducteur ou excitation
 - Camembert ou saucisson
 - Champ radial ou axial
- Propriétés
 - Intrinsèquement réversibles
 - Moteur (conv. récepteur P_{elec} absorbée >0 , P_{meca} fournie >0)
 - Générateur (conv. générateur)
 - Quadrants de fonctionnement

Vision convertisseur électromagnétique

Matériaux magnétiques canalisent les lignes de champs

Entrefer stocke majoritairement l'énergie électromagnétique

Entrefer mince: magnétisation facile, densité d'énergie élevée

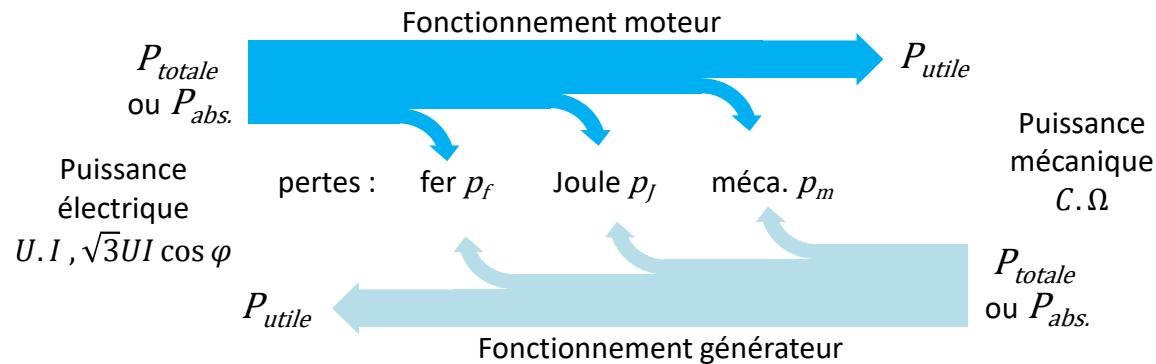
A densité d'énergie cte, la puissance fixe les dimensions de la machine

Structures intrinsèquement réversibles

$$E_{mag} = \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2 \mu_0 \mu_r} B^2$$

$$\mu_{rfer} \gg \mu_{rair} \rightarrow E_{air} \gg E_{fer}$$

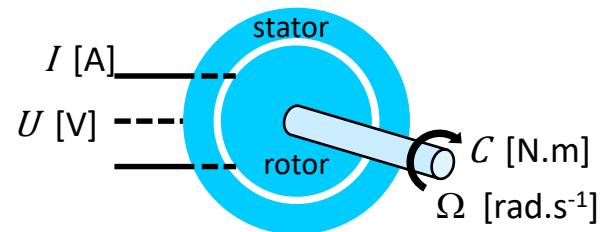
Vision convertisseur électromécanique



$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \Sigma \text{pertes}}$$

Caractéristiques communes

- Stator fixe (pas forcément extérieur), rotor mobile
- Entrefer mécanique et magnétique
- Excitation, inducteur
- Puissance, induit

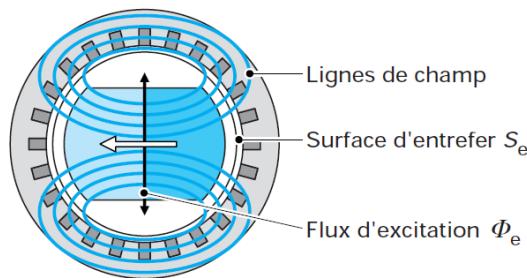


Le principe de conversion électromagnétique dans les machines tournantes repose sur la mise en jeu des forces électromotrices induites (loi de Lenz-Faraday).

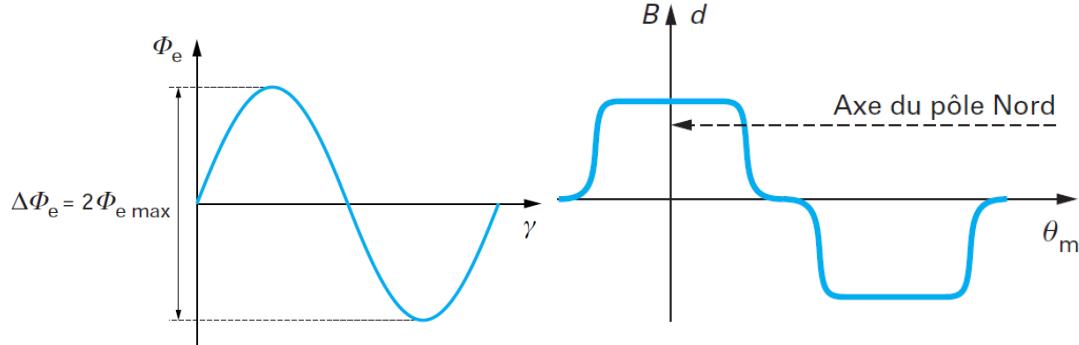
Il est donc nécessaire que l'induction, le flux, soient des fonctions variables du temps

1^{ère} solution: mouvement relatif de l'induit par rapport à l'inducteur

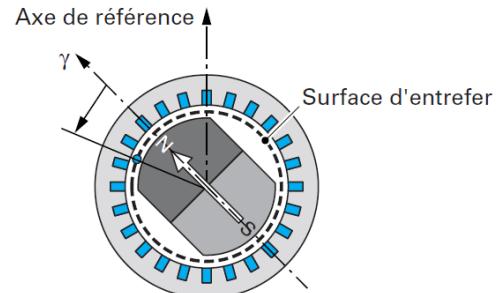
Prenons l'exemple d'un enroulement inducteur au rotor (électro-aimant alimenté par $I = \text{cte}$)
Le rotor est entraîné à vitesse angulaire constante Ω .



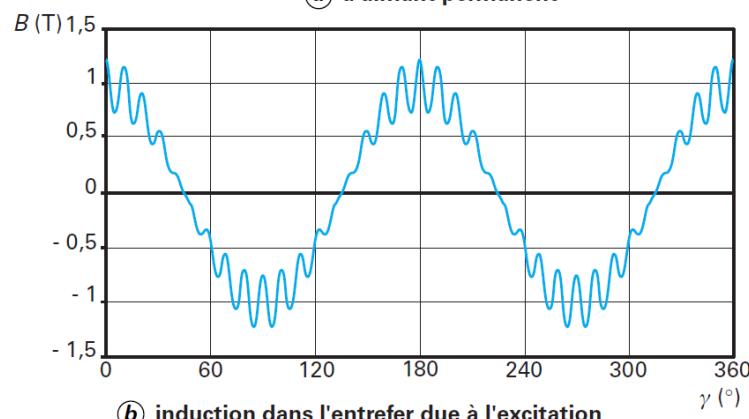
a) calcul du flux d'excitation



b) variation du flux d'excitation



a) à aimant permanent



b) induction dans l'entrefer due à l'excitation

2^{ème} solution: courants polyphasés dans des bobines réparties dans l'espace

Théorème de Ferraris

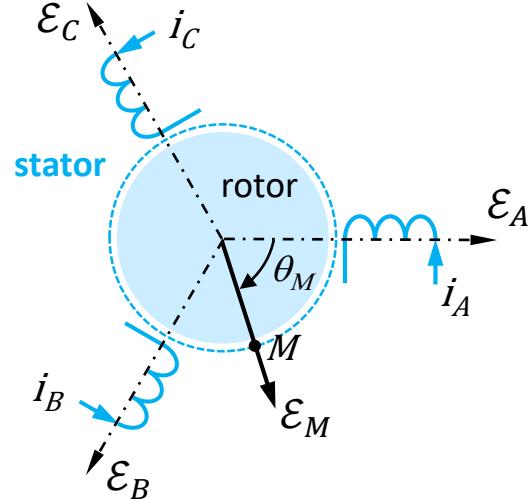
Une armature multipolaire (2p pôles), polyphasée d'espace et parcourue par des courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés (de pulsation ω) crée dans l'entrefer une force magnétomotrice circulaire unique tournante, dans l'espace lié à l'armature à la vitesse angulaire $\Omega = \omega/p$

$$\begin{cases} i_A(t) = I_m \cos(\omega t) \\ i_B(t) = I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C(t) = I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathcal{E}_A(t) = n I_m \cos(\omega t) \\ \mathcal{E}_B(t) = n I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \mathcal{E}_C(t) = n I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

Forces magnétomotrices au point M (dans l'entrefer):

$$\begin{cases} \mathcal{E}_A(M, t) = n I_m \cos(\omega t) \cos(\theta_M) \\ \mathcal{E}_C(M, t) = n I_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_M - \frac{2\pi}{3}) \\ \mathcal{E}_B(M, t) = n I_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \cos(\theta_M - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$



Force magnétomotrice résultante au point M:

$$\mathcal{E}(M, t) = \mathcal{E}_A(M, t) + \mathcal{E}_B(M, t) + \mathcal{E}_C(M, t) = \frac{3 n I_m}{2} \cos(\omega t - \theta_M)$$

Obtention d'un champ tournant uniforme ou circulaire (fmm constante dans le repère rotor)



Moteurs à courant continu

aimants permanents
excitation shunt
excitation série
excitation compound



Moteurs synchrones

Moteurs universels

Moteurs à aimants permanents
à aimants alternés
à commutation électronique
brushless

Moteurs à réductance variable

Moteurs pas à pas



Moteurs hybrides

Moteurs à hystéresis



Moteurs asynchrones

Moteurs triphasés à cage

À cage

Moteurs monophasés

À condensateur

À bobine à écran

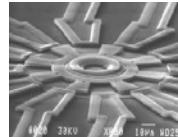


Moteurs piézoélectriques

Microactionneurs

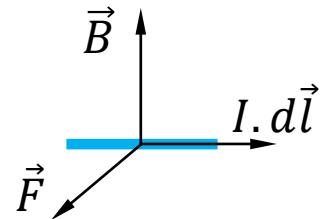
magnétiques

électrostatiques



- Force de Laplace

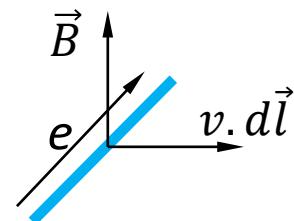
$$\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$



Conducteur parcouru par un courant I soumis à une induction B est soumis à une force

- Loi de Lenz-Faraday

$$e = - \frac{d\varphi}{dt}$$



Conducteur se déplaçant à la vitesse v sous un induction B est le siège d'une fem

- Règle du tirebouchon, bonhomme d'Ampère, main droite

Permet d'orienter le flux créé par un courant dans une spire

- 4ème équation de Maxwell ($\operatorname{div} \vec{B} = 0$), le flux ($\varphi = \vec{B} \cdot \vec{s}$) est conservatif

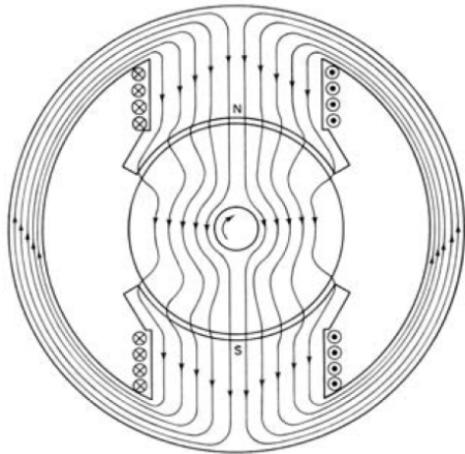
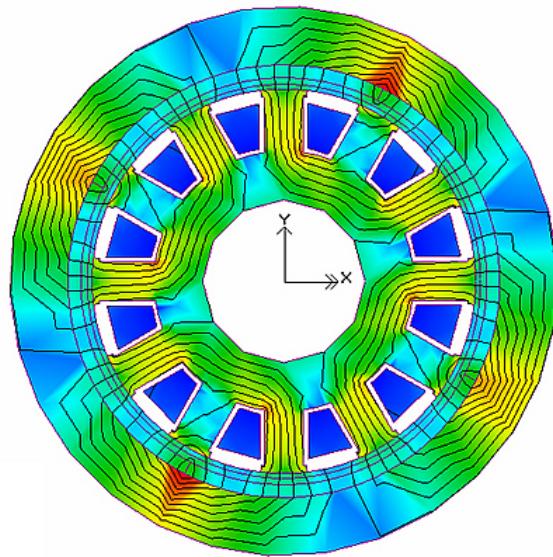
Équations de Maxwell (macroscopique)

Loi d'induction de Faraday $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

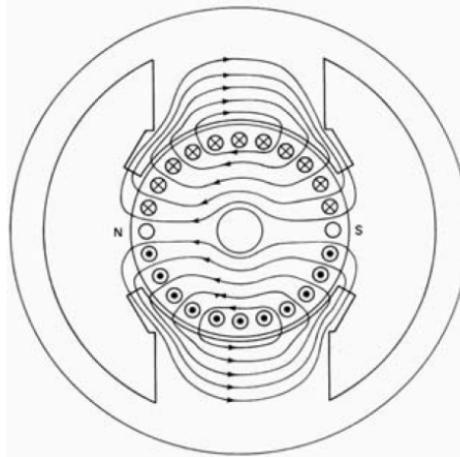
Loi de Maxwell-Ampère $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Loi de Gauss $\text{div} \vec{D} = \rho$

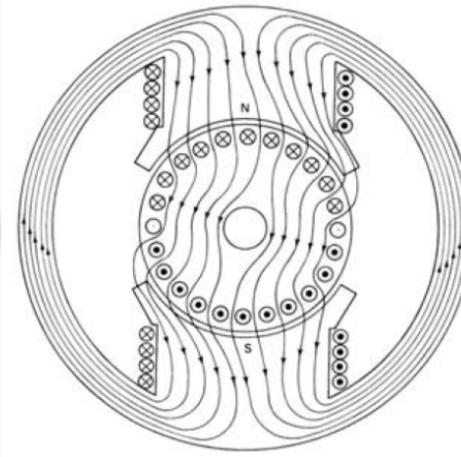
Conservation du flux $\text{div} \vec{B} = 0$



inducteur seul



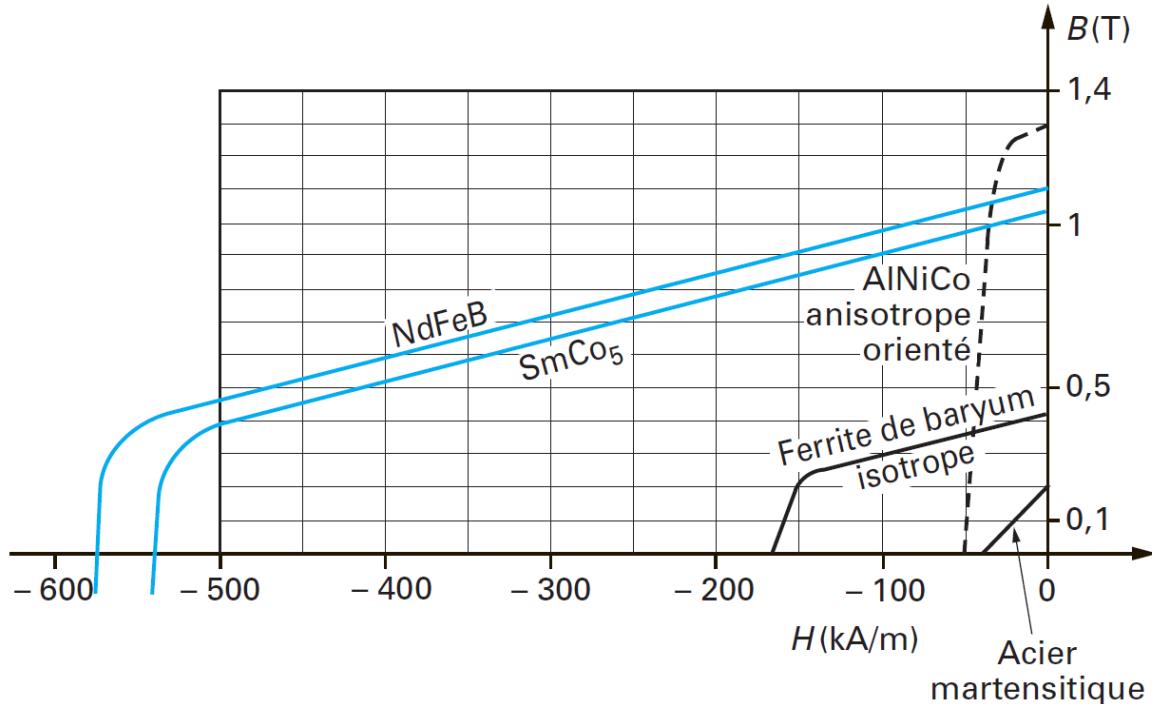
induit seul



induit + inducteur

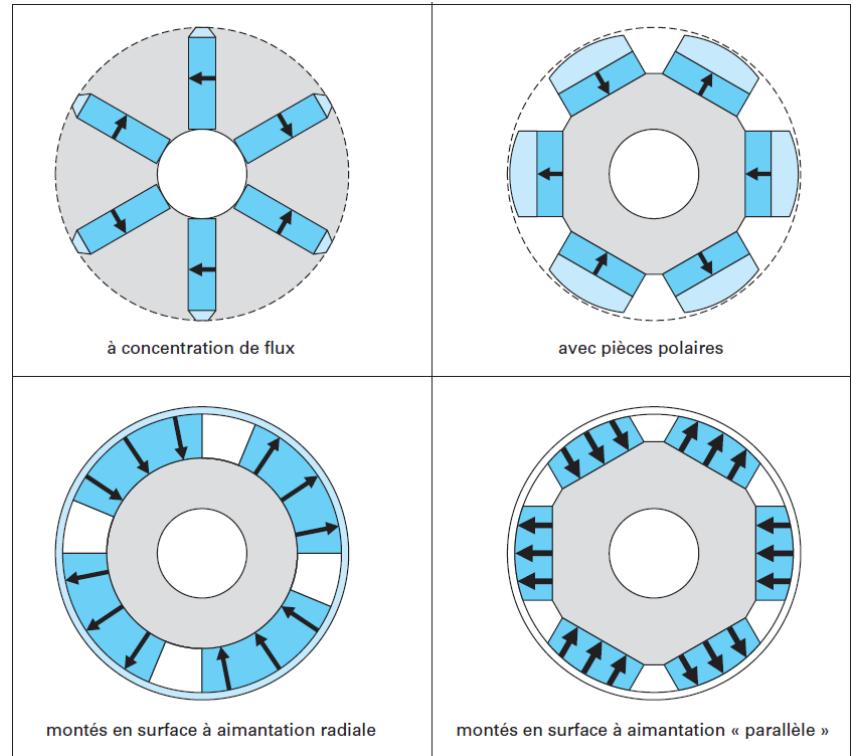
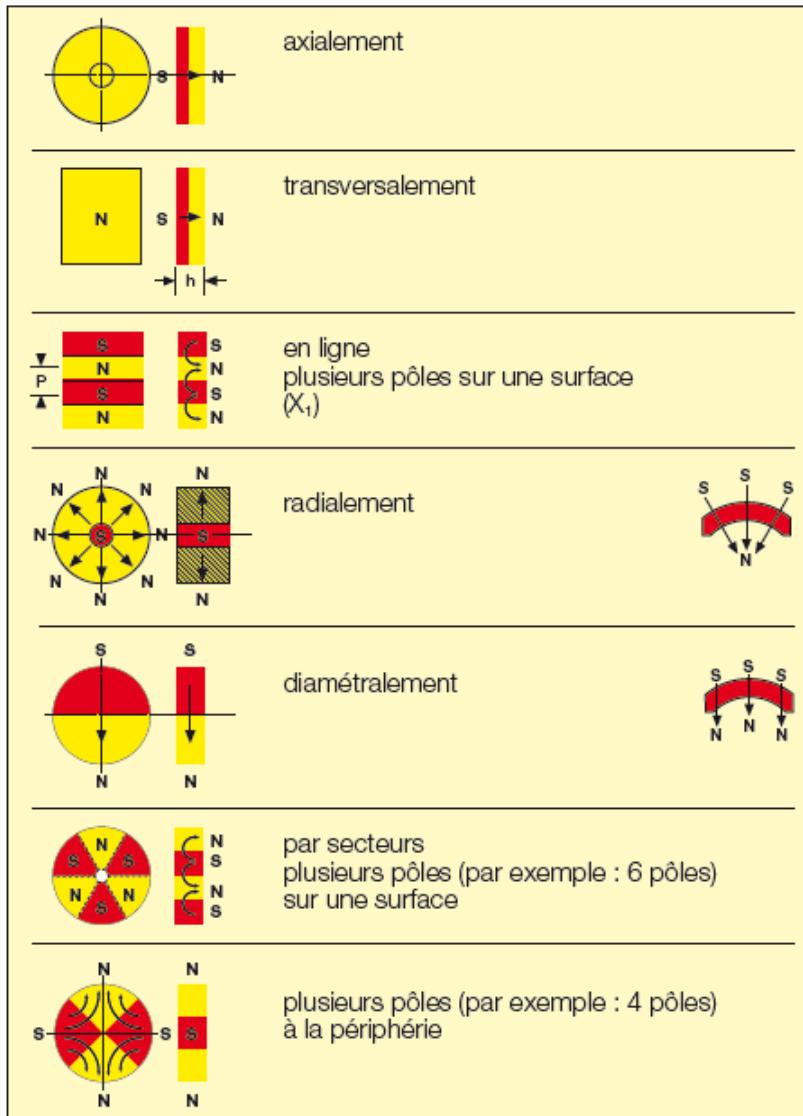
Lignes de champ d'une machine à courant continu à inducteur bobiné

Aimants permanents

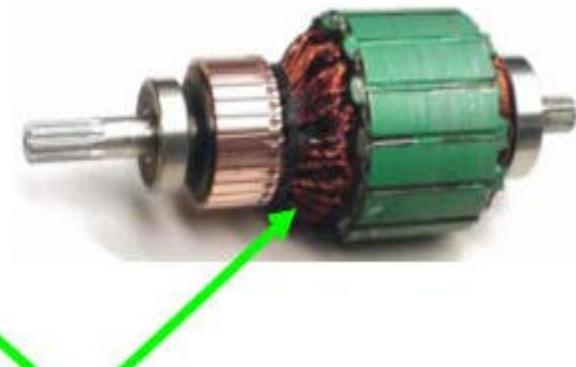
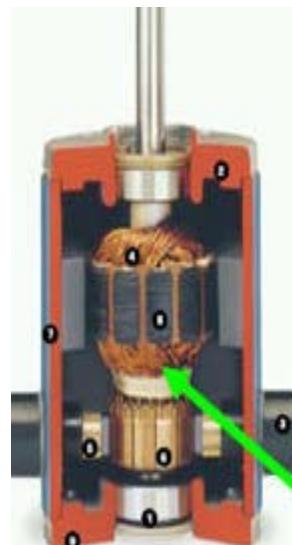
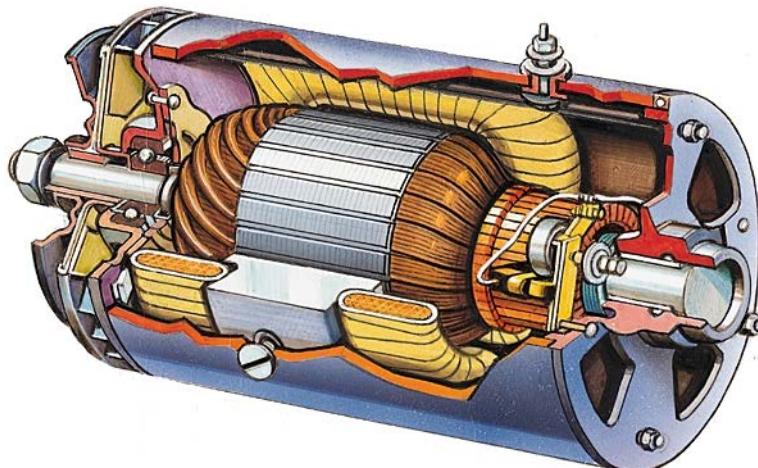
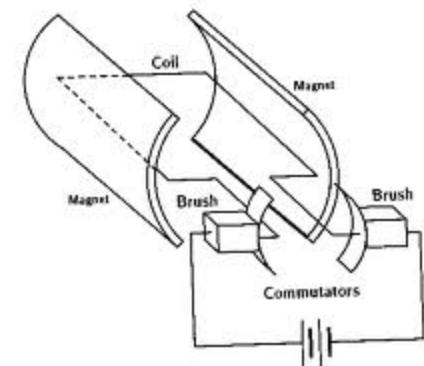
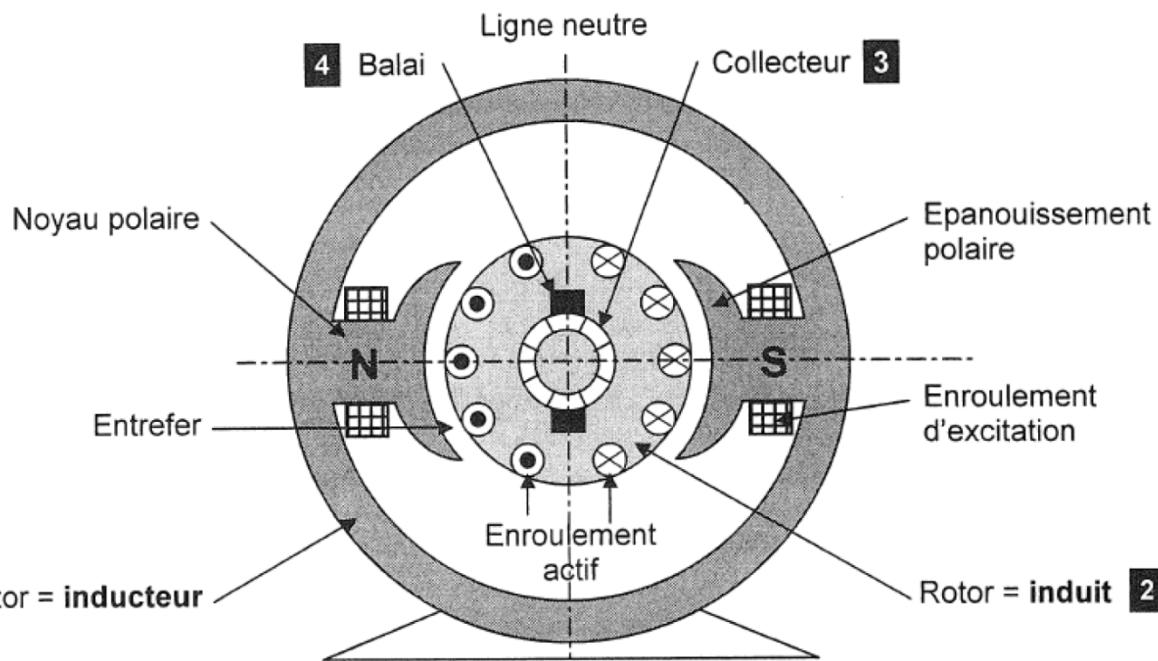


| Type aimant | Induction rémanente à 120°C B _r (T) | Energie spécifique BH _{max} (kJ/m ³) | Température max utilisation T (°C) | Application |
|-------------------|--|---|------------------------------------|---|
| Acier | 0,2 | 1 | | Tournevis aimanté |
| Ferrite | 0,4 | 8 | 350 | Automobile, petits moteurs, haut-parleurs |
| AlNiCo | 1,3 | 40 | 450 | Moteurs industriels |
| SmCo ₅ | 1 | 150 | 250 | Moteurs industriels, haut-parleurs |
| NdFeB | 1,1 | 200 | 200 | Moteurs industriels |

Aimantation et disposition

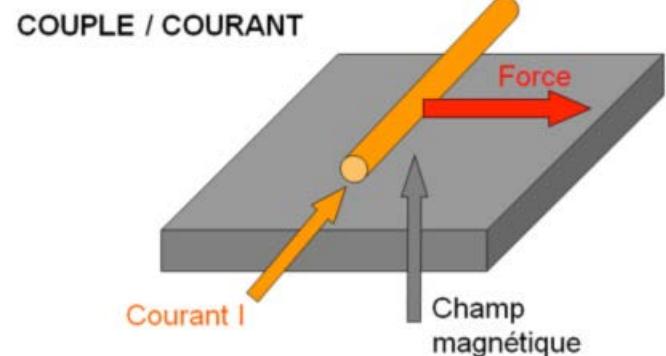
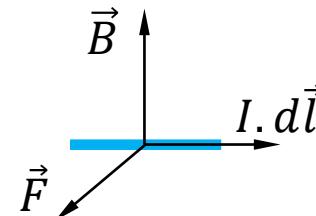
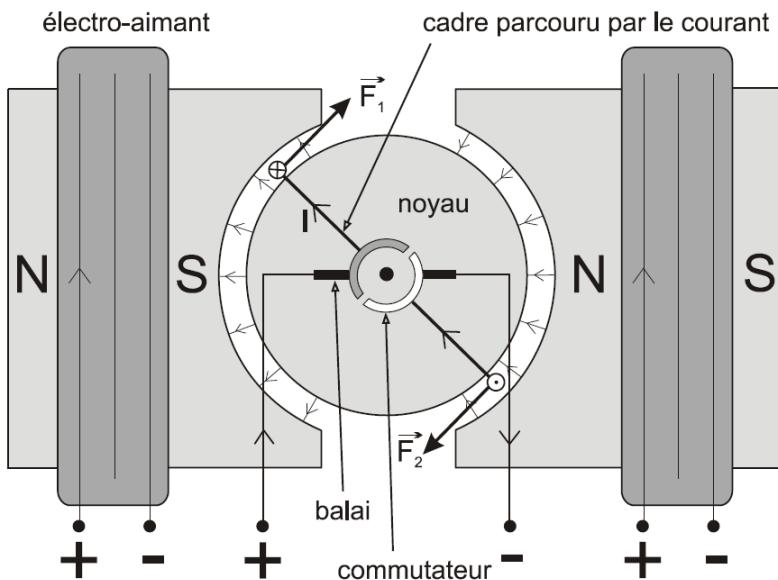


3 Machine à Courant Continu (MCC): constitution



Un brin conducteur de l'induit de longueur l est alimenté par un courant I et placé dans le flux magnétique d'un pôle inducteur créant une induction B à proximité de ce brin.

Il subit alors la force de Laplace : $\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$



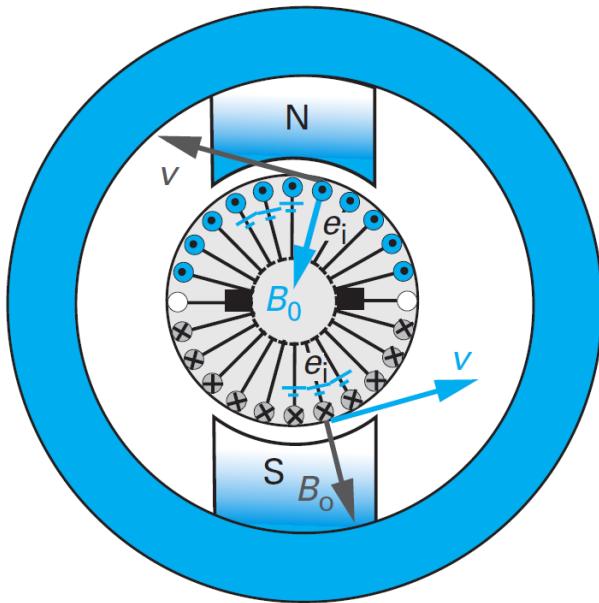
L'ensemble collecteur-balais permet la commutation du sens du courant dans les brins en fonction du pôle. Ainsi, cette force existe pour chaque conducteur à la périphérie de l'induit.

Le moment de l'ensemble des paires de forces telles (\vec{F}_1, \vec{F}_2) est appelé le couple C [N.m]

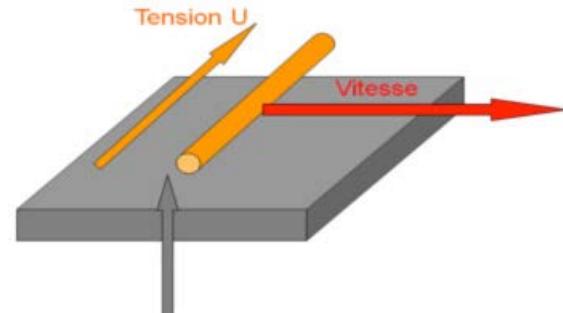
A flux inducteur donné (induction fixée), le couple ne dépend que du courant.

Un brin conducteur de l'induit de longueur l est entraîné à la vitesse v dans le flux magnétique d'un pôle inducteur créant une induction B à proximité de ce brin.

Il est alors le siège d'une fem induite : $-e = d\vec{l} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{B})$



TENSION / VITESSE

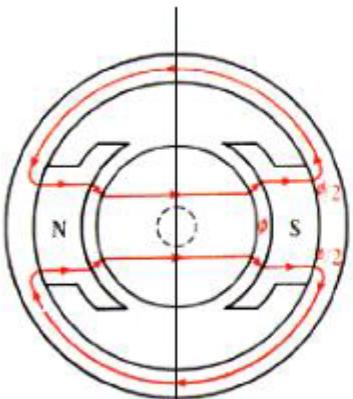


L'ensemble collecteur-balais permet d'obtenir des fem de même polarité (redressement mécanique des fem alternatives)

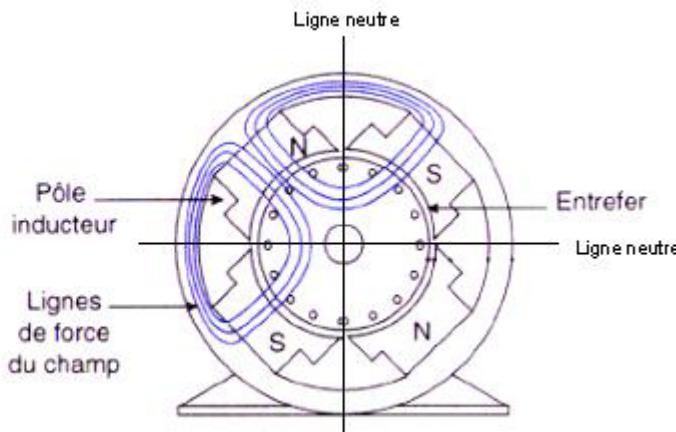
La force électromotrice résultante est appelée la fem de la machine E [V]

A flux inducteur donné (induction fixée), la force électromotrice ne dépend que de la vitesse.

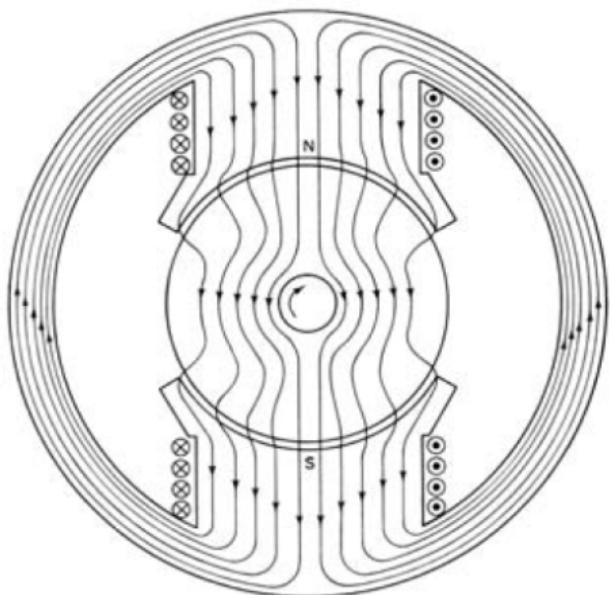
3 Cartographie du champ magnétique d'une MCC



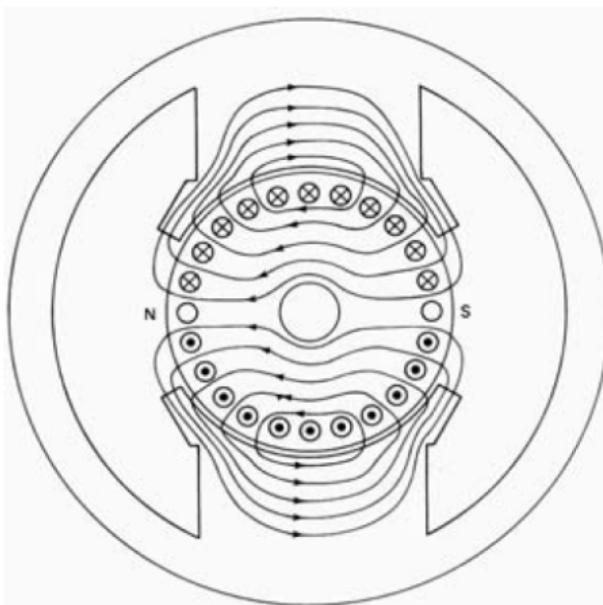
Machine bipolaire



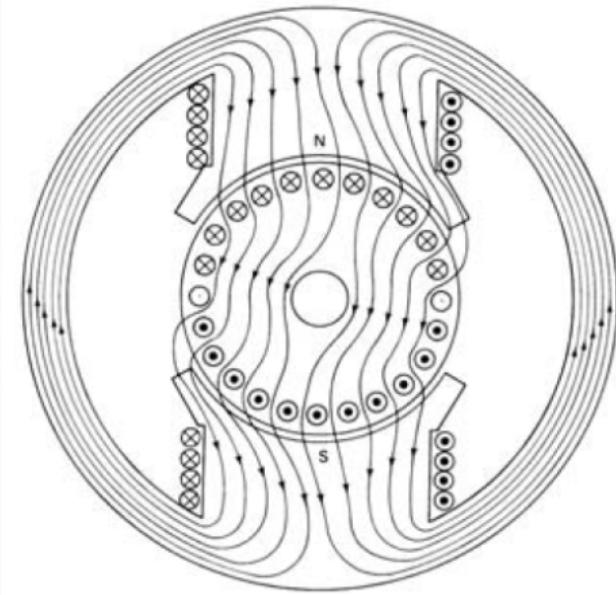
Machine tétrapolaire



Inducteur seul

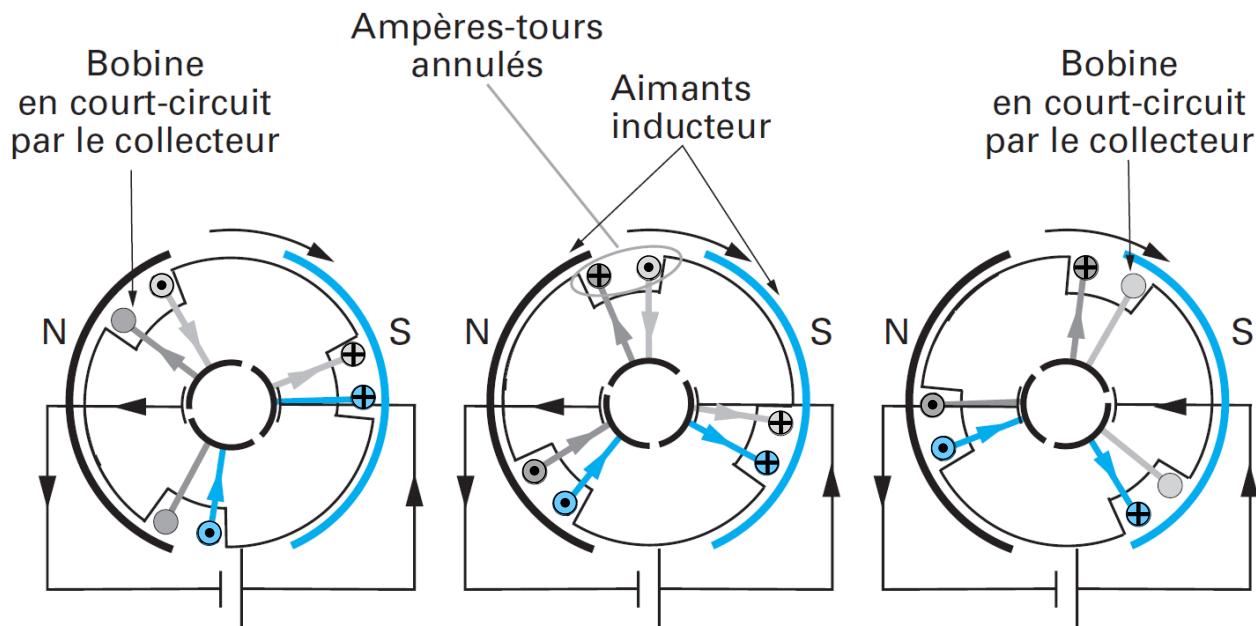
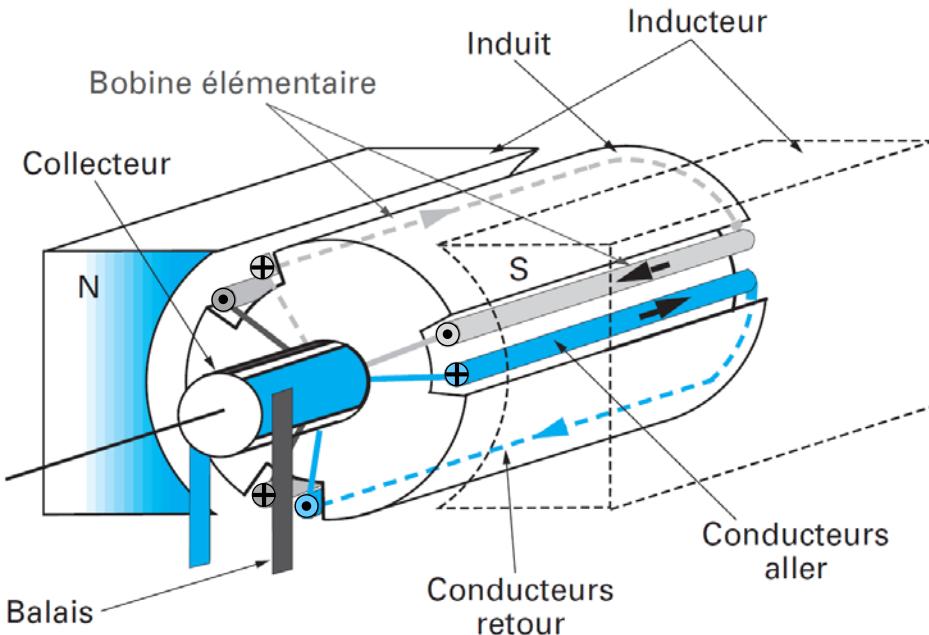


Induit seul

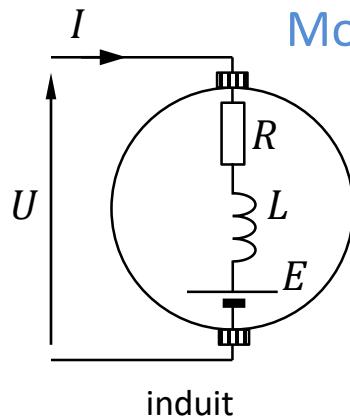


inducteur+induit

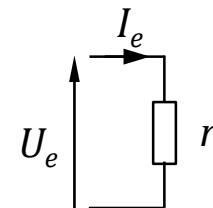
Rôle de l'ensemble collecteur-balais



Schéma



Modèle (convention récepteur)



inducteur bobiné aimants permanents

Force électromotrice [V]

$$E = k \cdot \varphi(I_e) \cdot \Omega = K_e \cdot \Omega$$

Couple électromagnétique [N.m]

$$C_{em} = k \cdot \varphi(I_e) \cdot I = K_c \cdot I$$

Équation électrique

$$U = R \cdot I + E = R \cdot I + K_e \cdot \Omega$$

Équation mécanique

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r = C_{em} - (C_p + C_r)$$

Constante de temps électrique

$$\tau_{elec} = \frac{L}{R}$$

Constante de temps mécanique

$$\tau_{meca} = \frac{JR}{K^2}$$

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + K\Omega$$

avec C_0 somme des couples résistants de « polarisation »

$$c = Ki = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_0$$

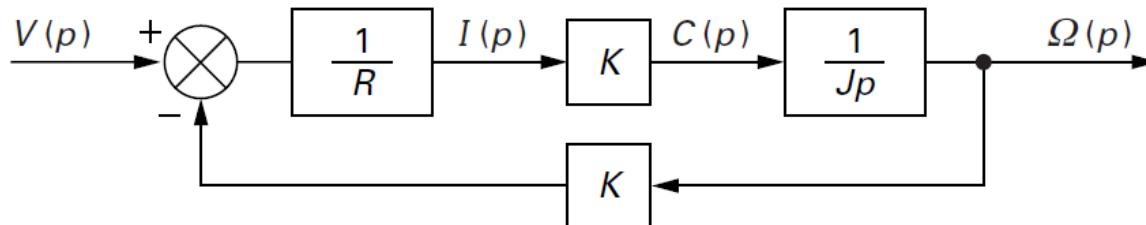
f coefficient de frottement visqueux équivalent déterminé également par linéarisation

$$v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

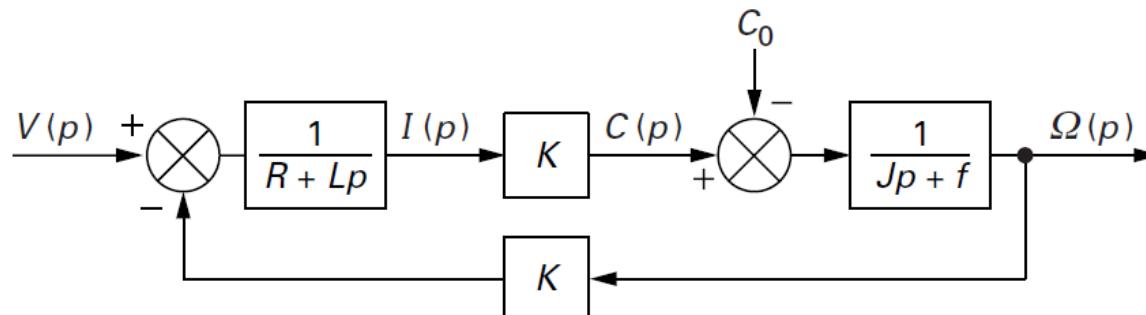
J moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes (moteur et charge),

$$K = M i_f$$

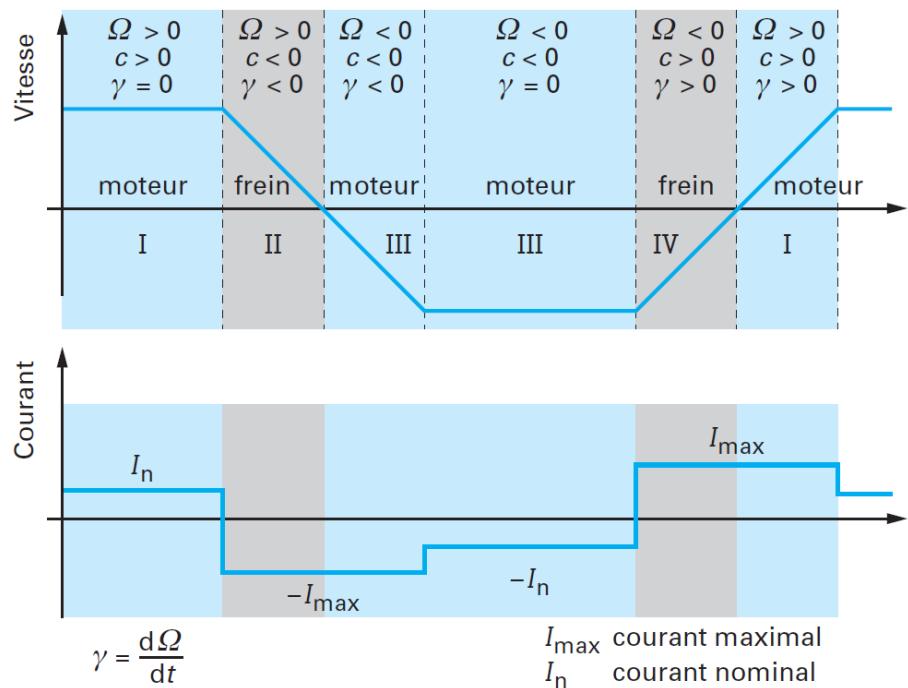
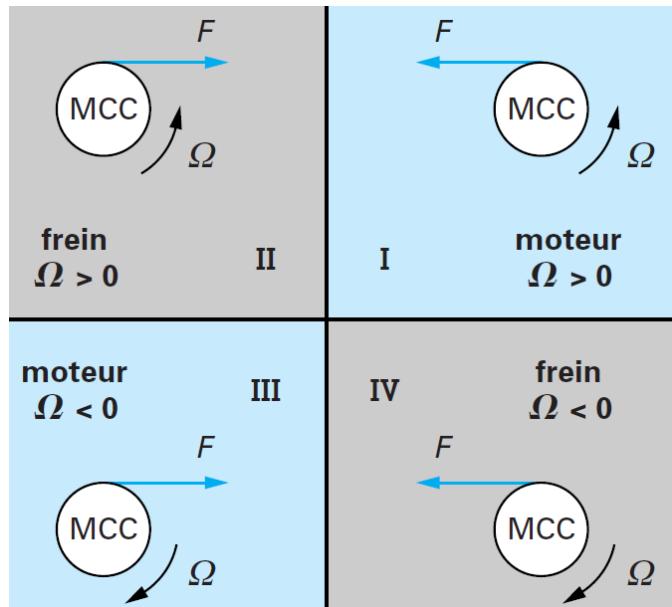
M coefficient mutuel de flux

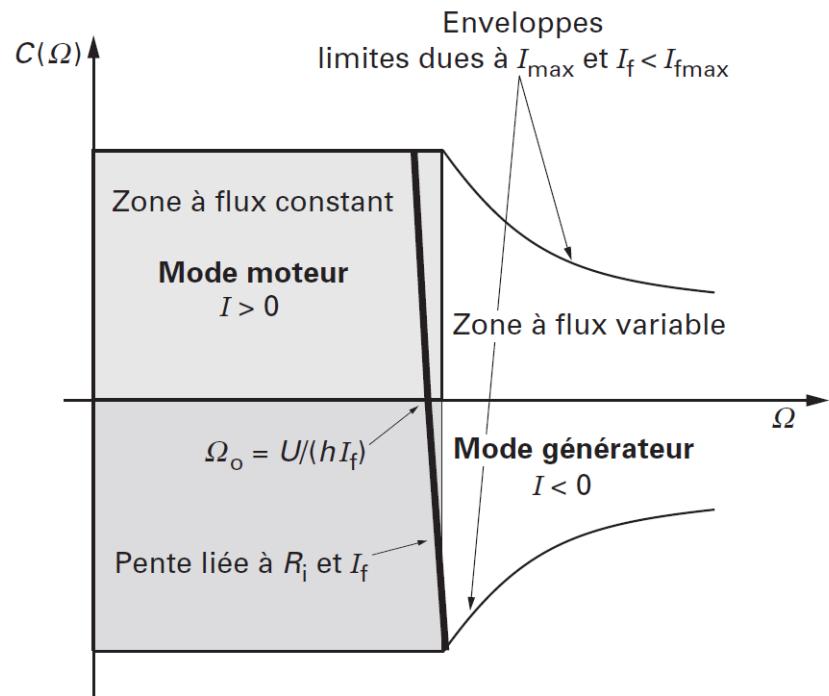
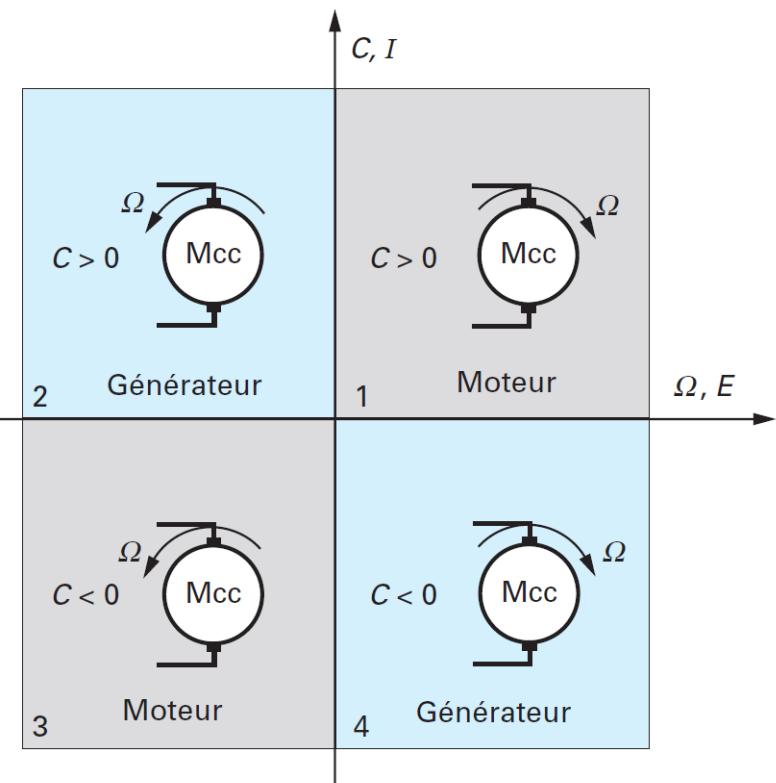


① L , f et C_0 non pris en compte



⑧ en tenant compte de tous les paramètres

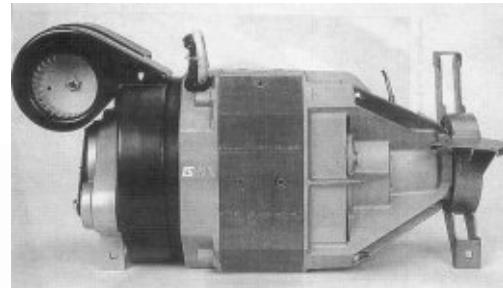




Machines à champ radial (conventionnel)

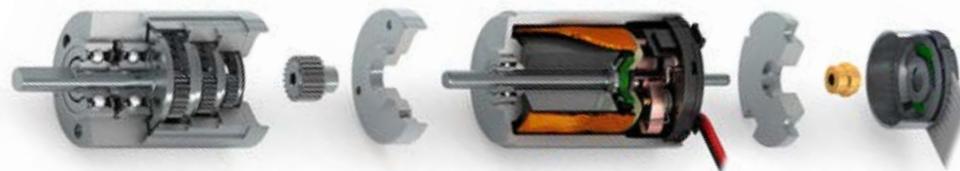
Excitation enroulement inducteur
(excitation indépendante, shunt, série, compound)

Excitation par aimants permanents



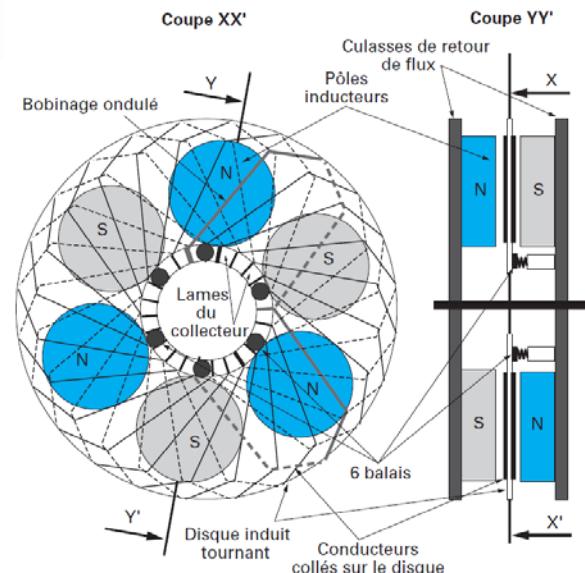
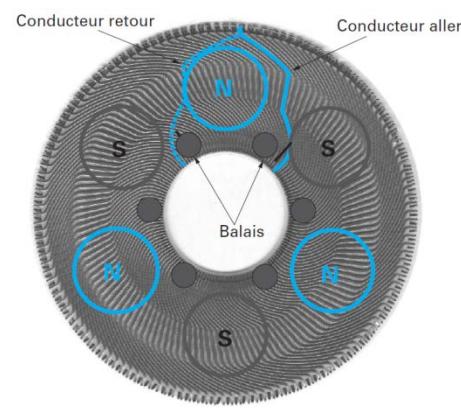
Machines sans fer

Enroulement d'induit tissé
Très faible inertie

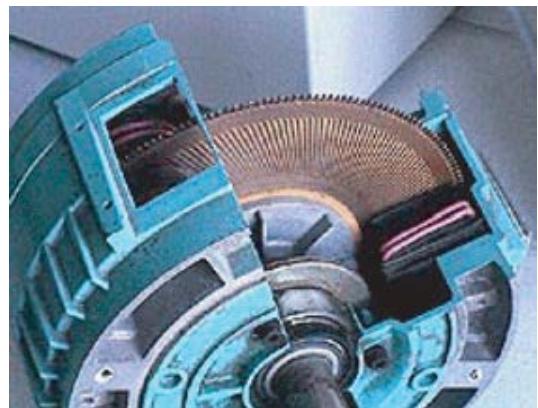
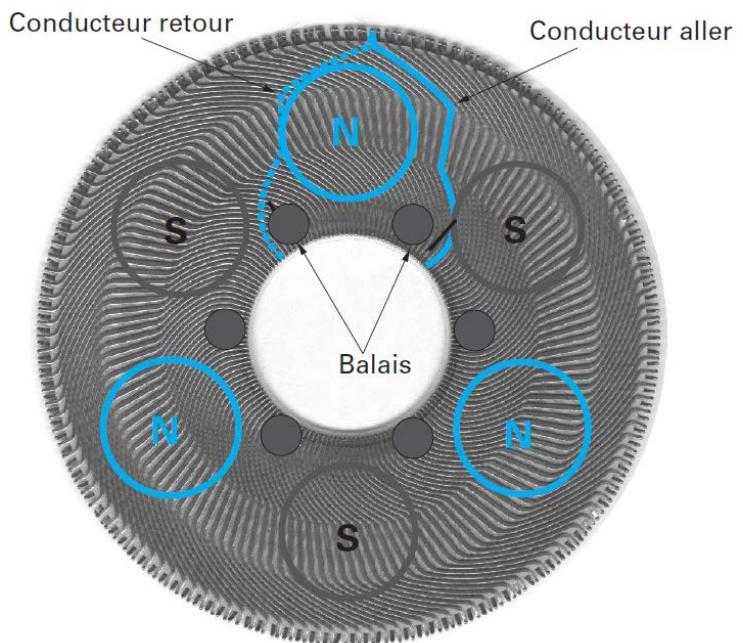
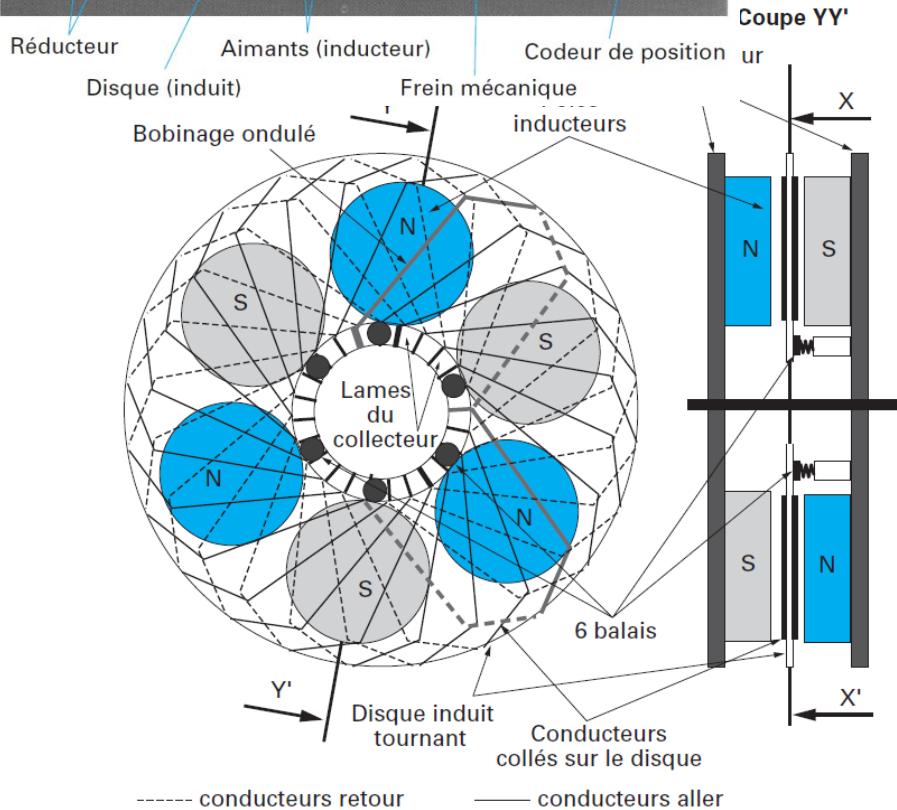
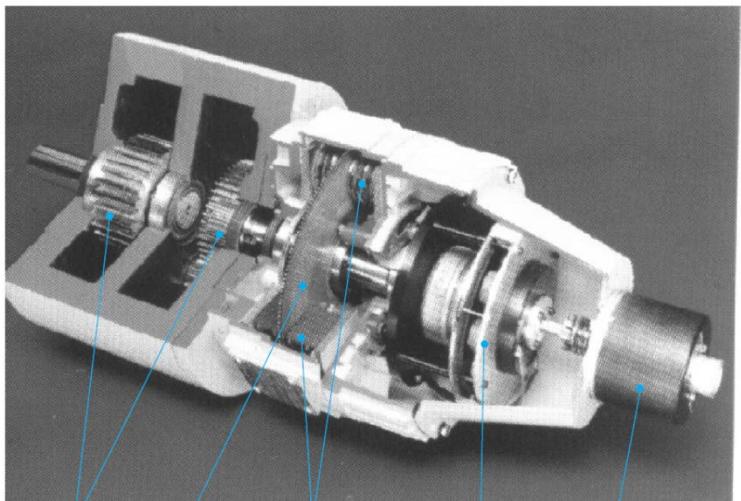


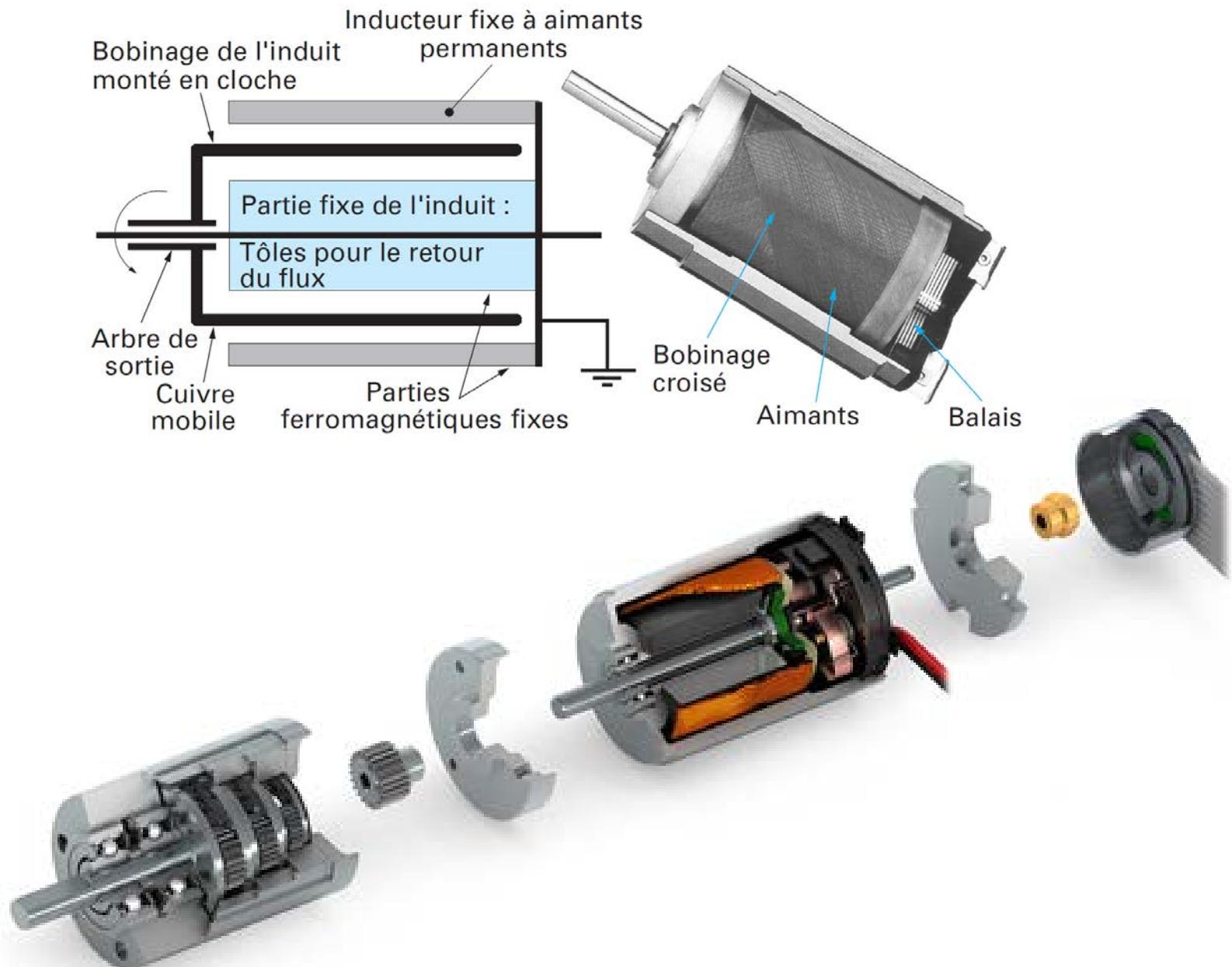
Machines à champ axial

Encombrement réduit suivant l'axe de rotation



MCC à induit discoïdal (sans fer)





• Caractéristiques

- Destinés au positionnement angulaire
- Capacité à développer un couple important à basse vitesse (voire à l'arrêt)
- Rotation discontinue par fraction de tour (pas)
- Caractéristiques communes:
 - Un stator à pôles saillants magnétisé par plusieurs bobinages
 - Un rotor à pôles saillants sans bobinage tournant
- Dispositif capable de convertir des informations à caractère discret

• Avantages

- Pilotage en boucle ouverte bas coût
- Résolution angulaire pouvant être élevée

• Inconvénients

- Limitation du couple de démarrage
- Instabilité de fonctionnement à certaines fréquences
- Accélérations relativement modestes

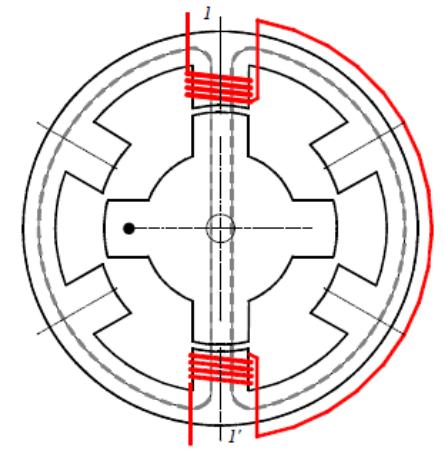
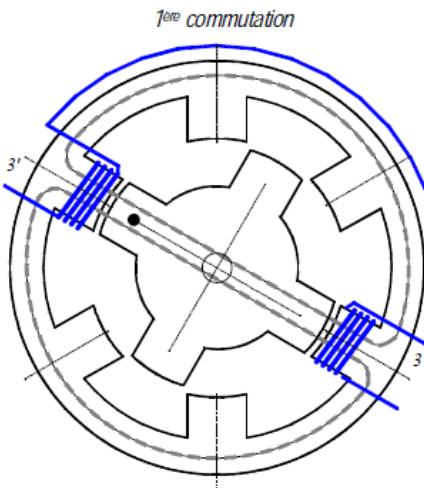
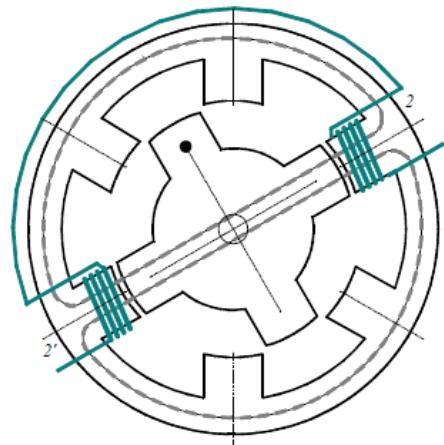
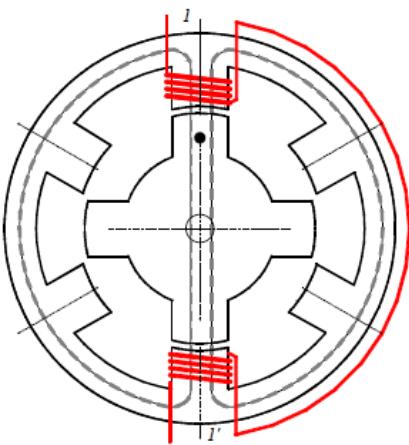
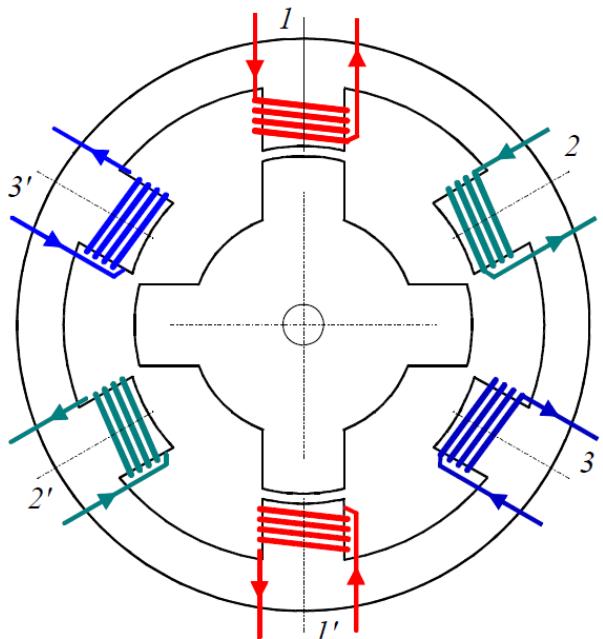
MRV à plots statoriques non dentés

Stator P nombre de plots (6)

p nombre de paire de plots (3)

q nombre de phases (3)

Rotor nR nombre de dents (4)



Nombre de pas sur un tour:

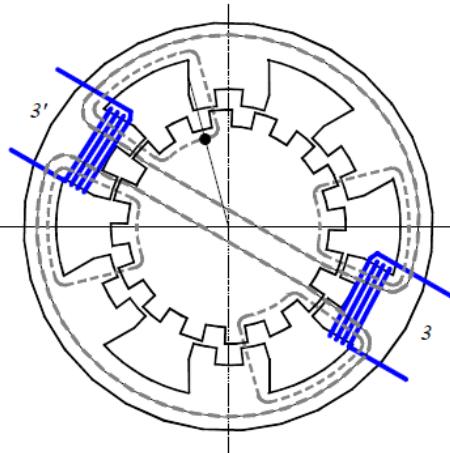
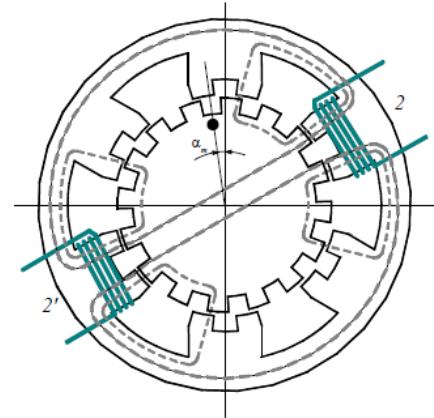
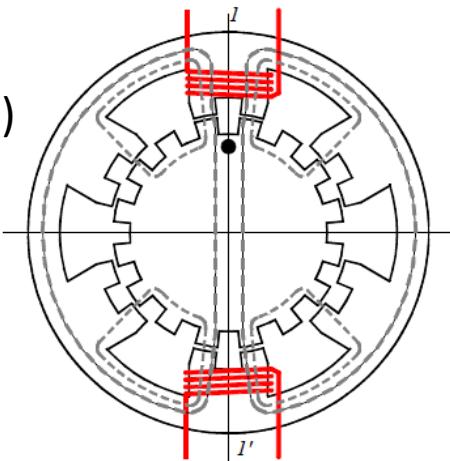
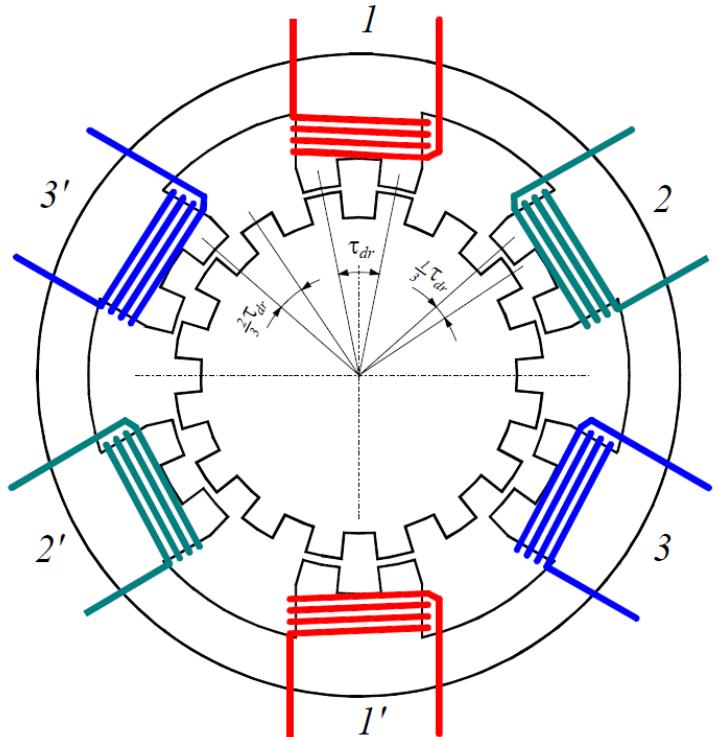
MRV à plots statoriques dentés

Stator P nombre de plots (6)

p nombre de paire de plots (3)

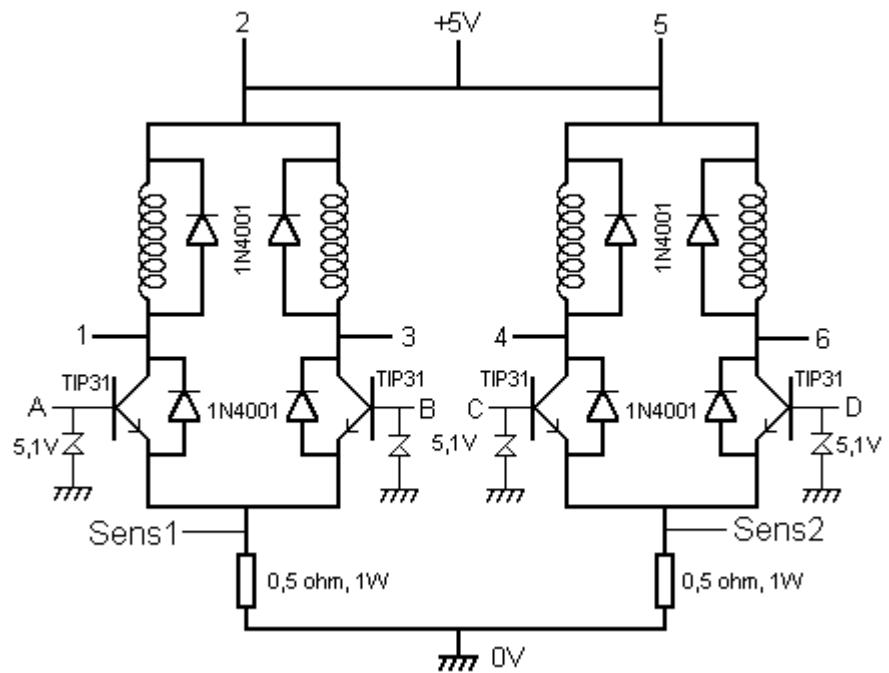
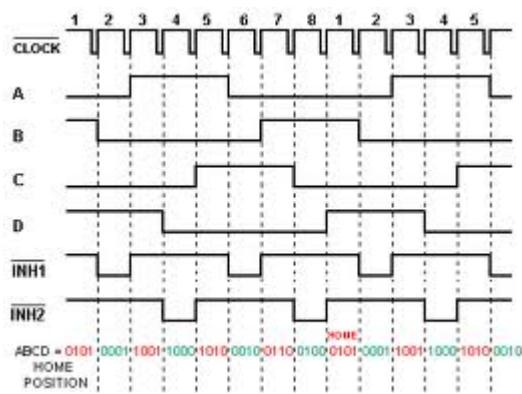
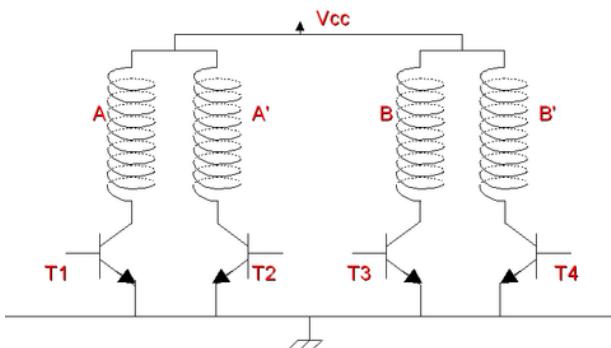
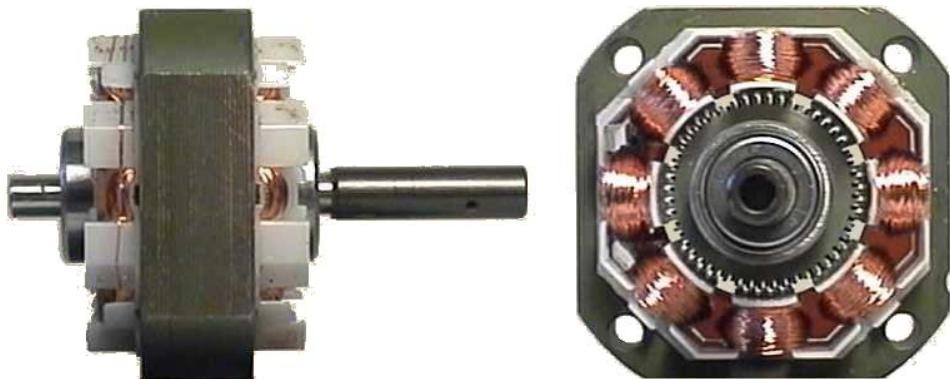
q nombre de phases (3)

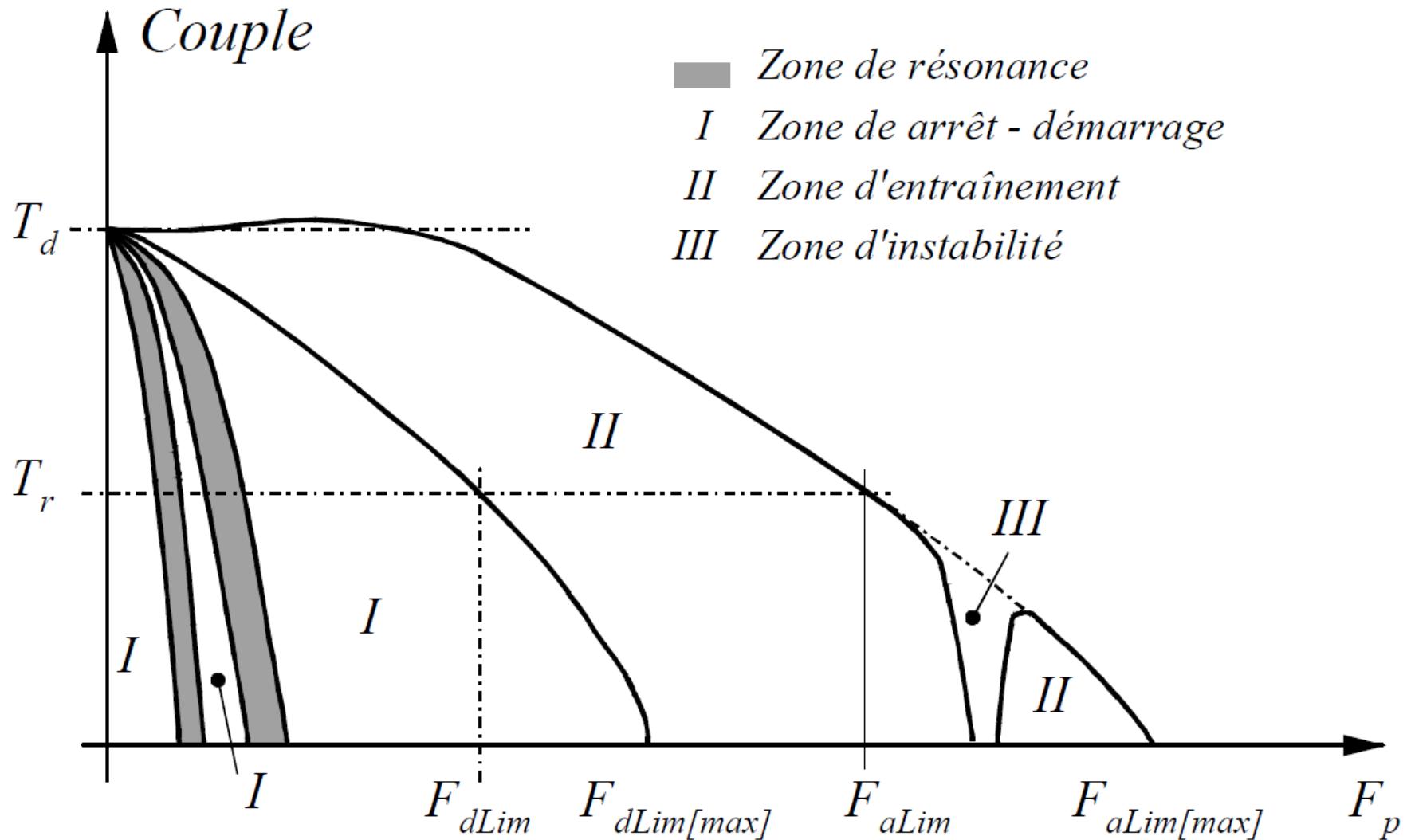
Rotor nR nombre de dents (16)



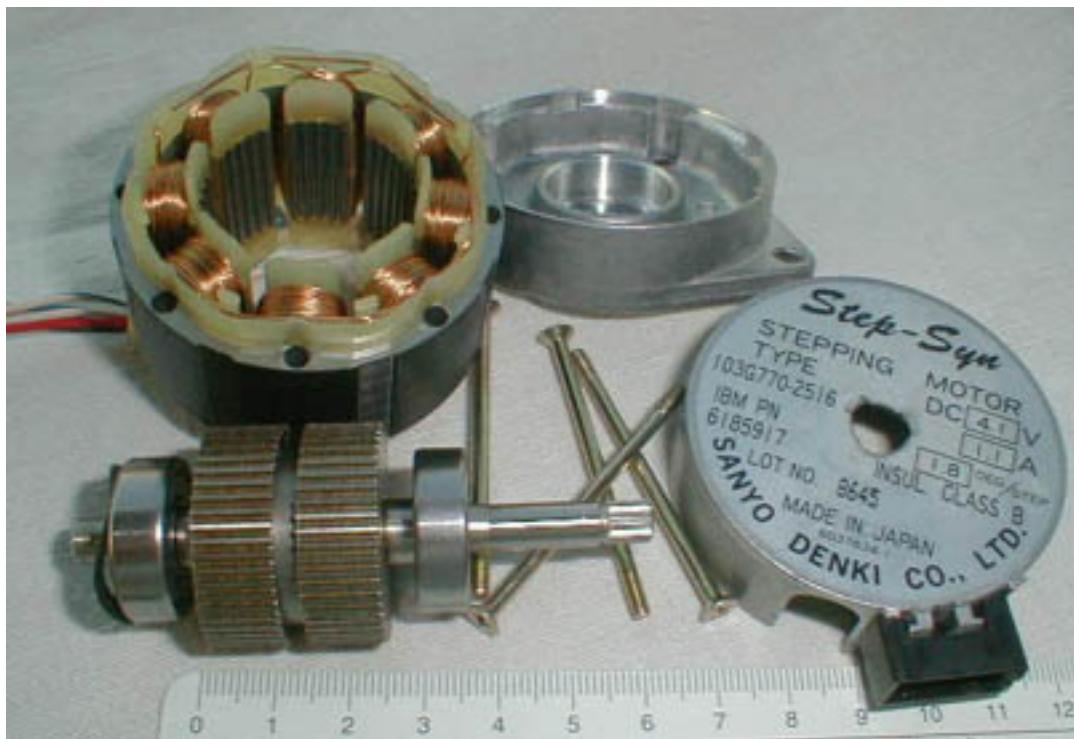
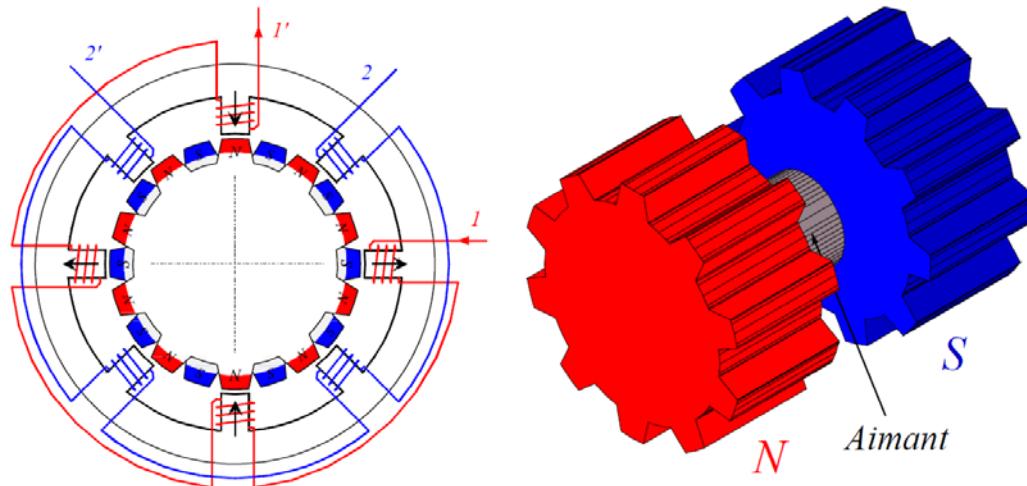
Nombre de pas sur un tour:

Moteur pas à pas (constitution, alimentation)





Moteur pas à pas Hybride



Théorème de Ferraris (champ tournant dans l'entrefer)

Une armature multipolaire ($2p$ pôles), polyphasée d'espace et parcourue par des courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés (pulsation ω) crée dans l'entrefer une force magnétomotrice circulaire unique tournante, dans l'espace lié à l'armature à la vitesse angulaire $\Omega = \omega/p$

Stator q nombre de phases (très souvent $q=3$)
 n nombre d'encoche

Rotor p paires de pôle (aimants permanents)

Schéma monophasé étoile équivalent du stator (induit): RLE
 résistance (R) + inductance (L) + force électromotrice (E)

Système Triphasé Equilibré Direct de FEM

$$\begin{cases} e_1(t) = E \cos(\omega t - \psi) \\ e_2(t) = E \cos(\omega t - \psi - \frac{2\pi}{3}) \\ e_3(t) = E \cos(\omega t - \psi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

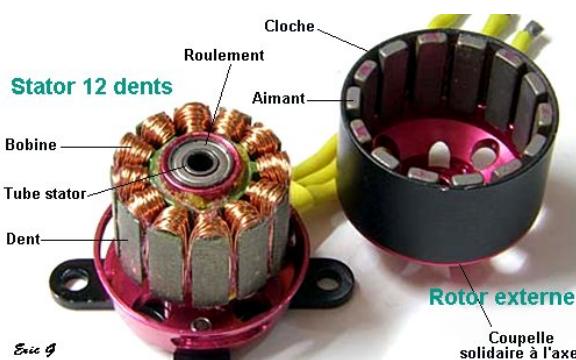
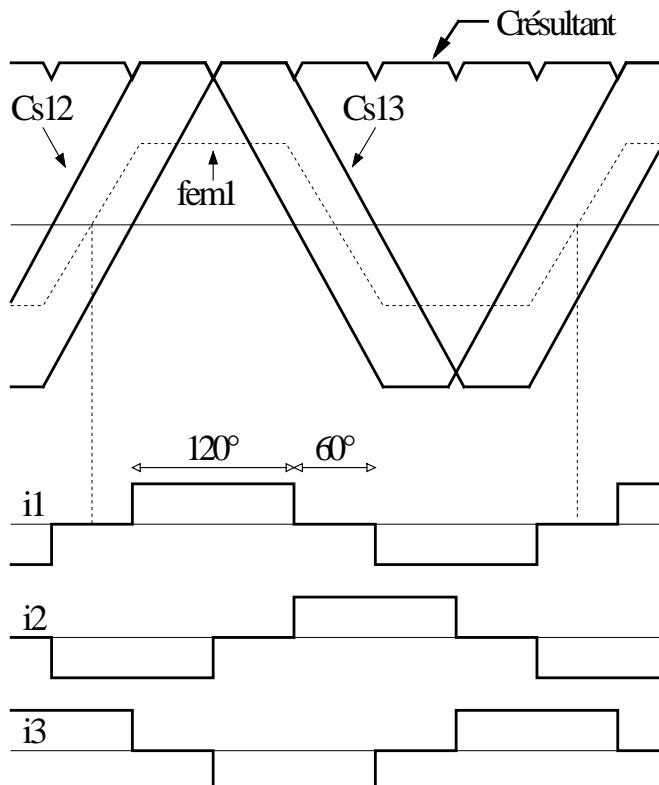
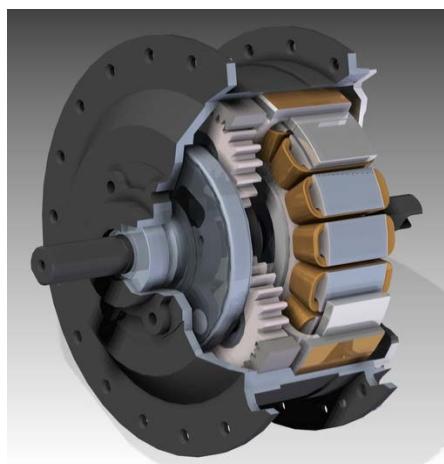
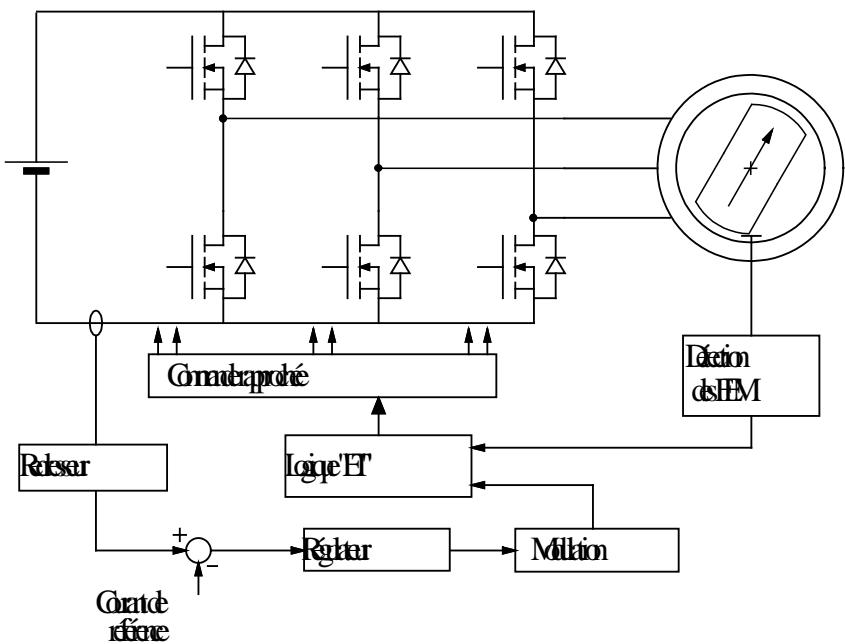
Système Triphasé Equilibré Direct de courants

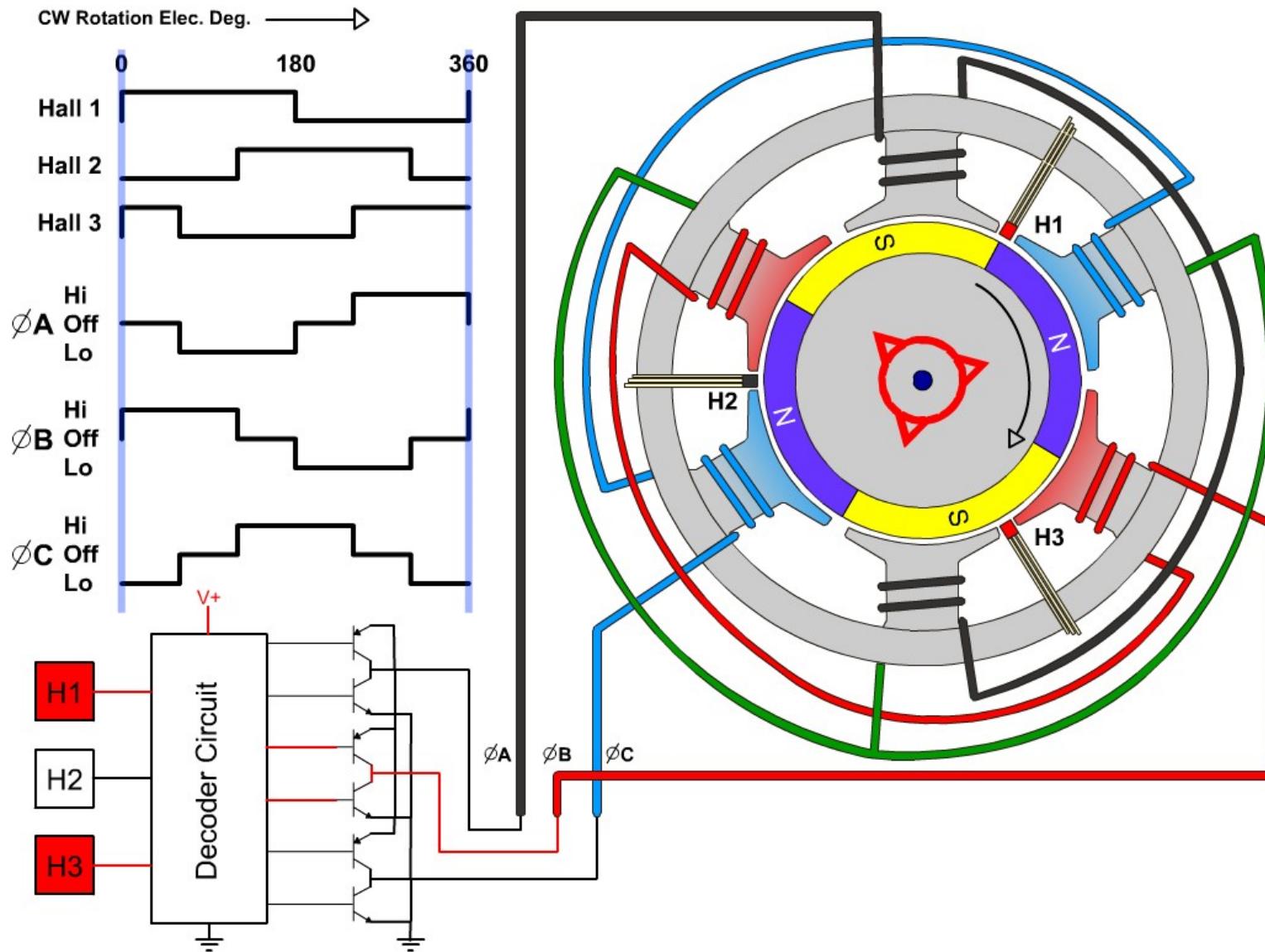
$$\begin{cases} i_1(t) = I \cos(\omega t) \\ i_2(t) = I \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_3(t) = I \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

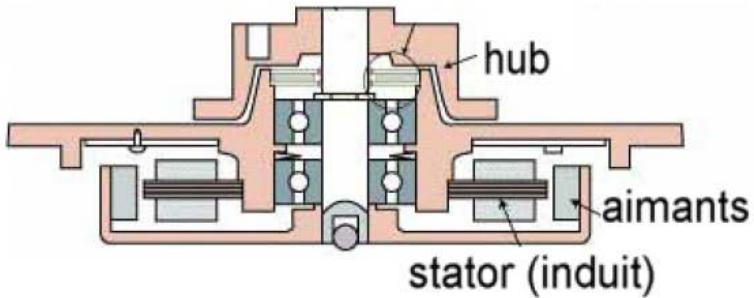
Couple électromagnétique

$$C_{em} = e_1 \cdot i_1 + e_2 \cdot i_2 + e_3 \cdot i_3$$

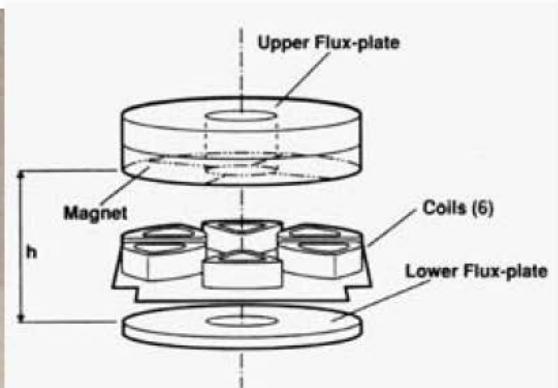
5 MSAP à fem trapézoidale (brushless DC motor)







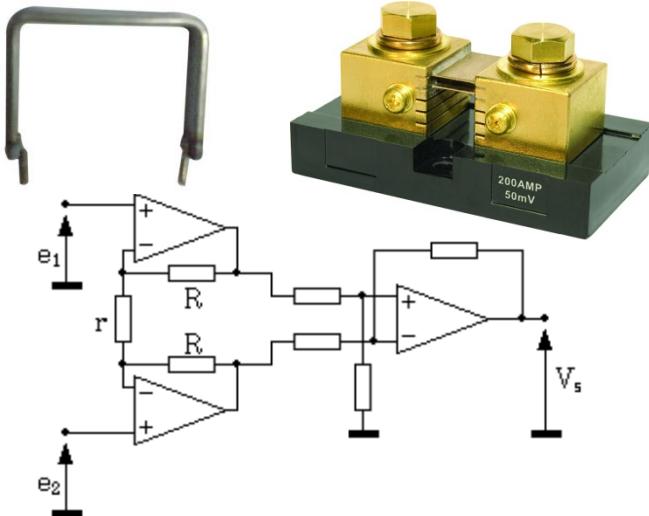
Moteur de disque dur (Nidec) à rotor extérieur



Moteur (photo de l'induit et schéma global)
triphasé à champ axial et bobinage dans l'entrefer.
Diamètre du disque environ 4 cm.

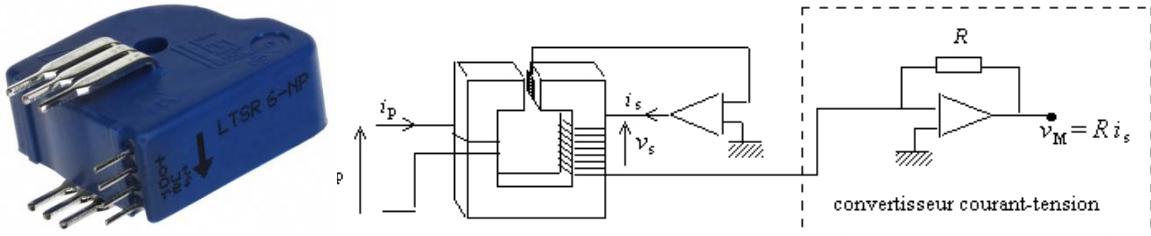
- Résistance shunt

- Résistance peu sensible à la température
- Mesure de 60 à 200mV pleine échelle
- Point froid commun avec électronique
- Electronique associée peut être sensible (potentiels flottants, mesure différentielle)



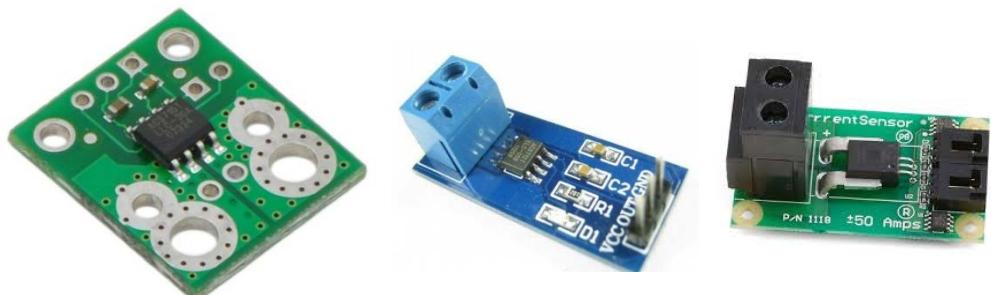
- Capteur à effet hall

- Isolation galvanique
- Composante continue
- Bande passante ~100kHz



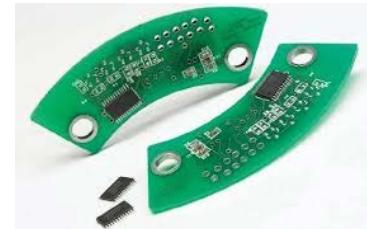
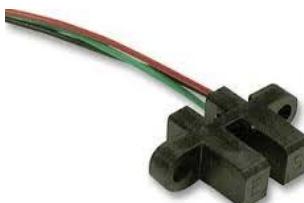
- Circuit intégré (base capteur à effet hall)

- Connexions puissance, mesure
- Circuit intégré (effet hall)
- Allegro ACS714



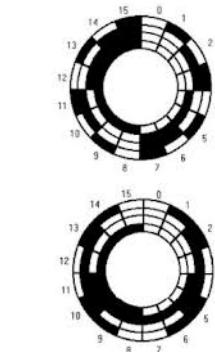
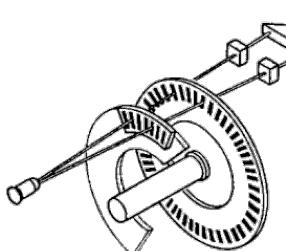
- Sonde à effet Hall

- 3 sondes, 6 indications de position
- Bon marché, encombrement réduit
- Machine synchrone à fem trapézoïdales



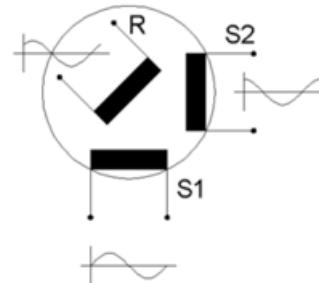
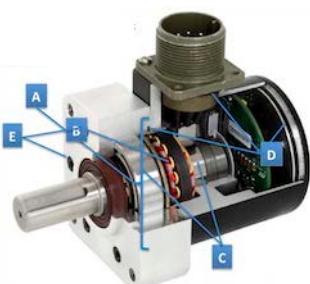
- Codeur optique

- Incrémental
- Absolu (sens de rotation et vitesse)

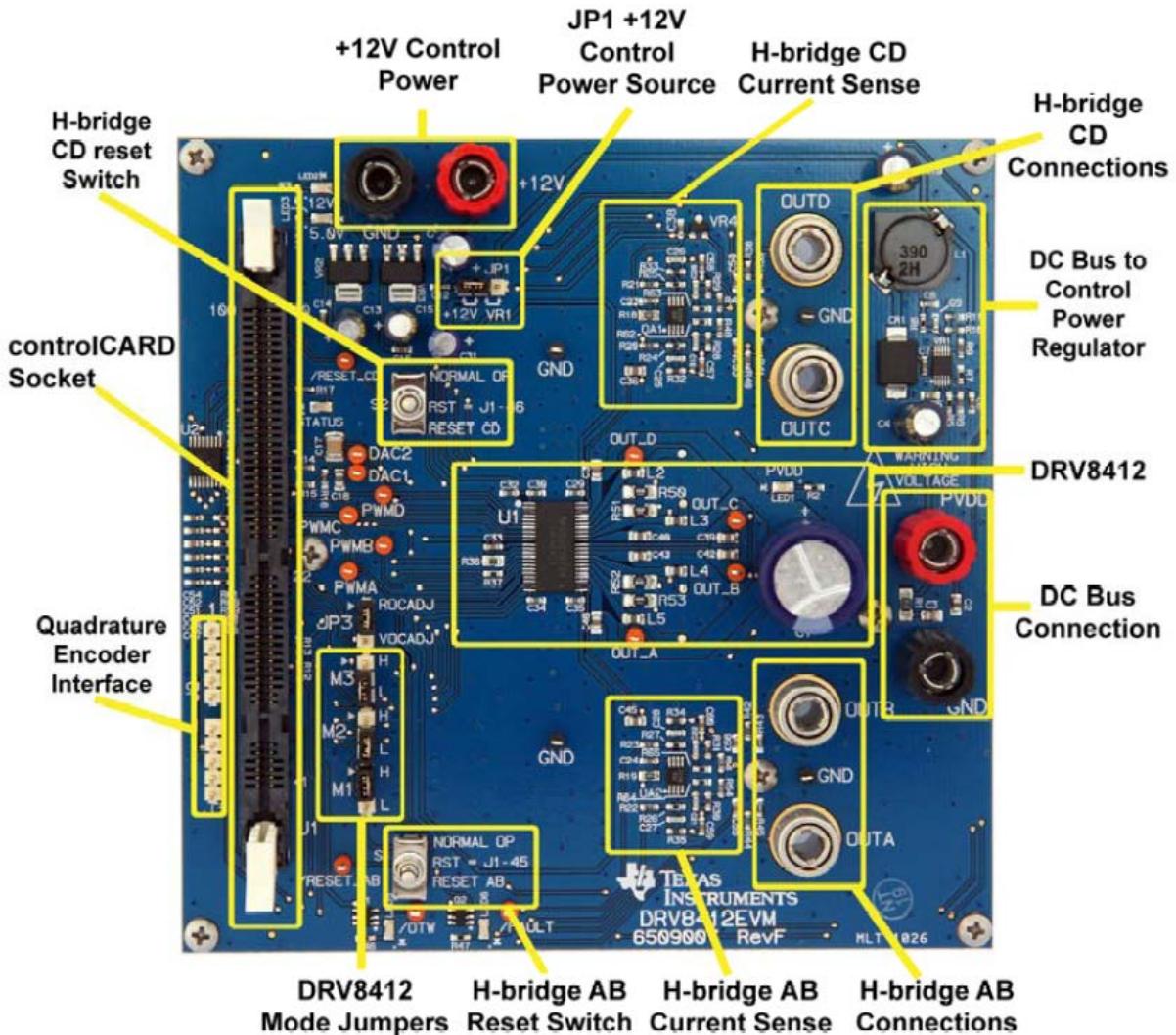
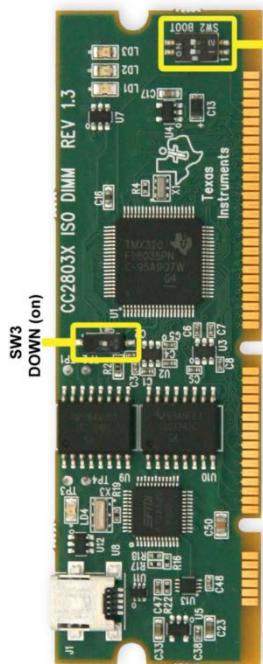


- Résolveur et synchro-résolveur

- Transducteur électromagnétique rotatif
- Reconstitution des fem machine



Composants du kit DRV8412-C2-KIT (Texas Instruments)

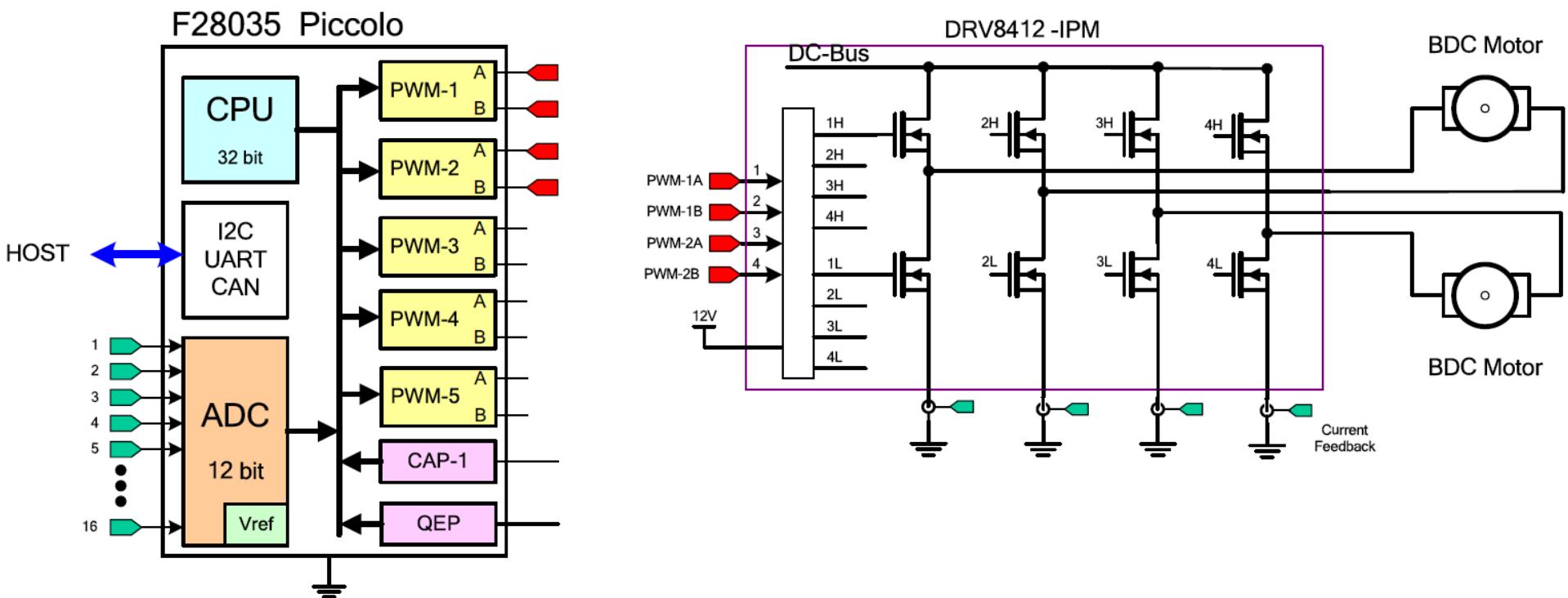


Bi-polar Stepper Motor
(4.2A/phase (parallel),
8-wire, 1.8°/step)

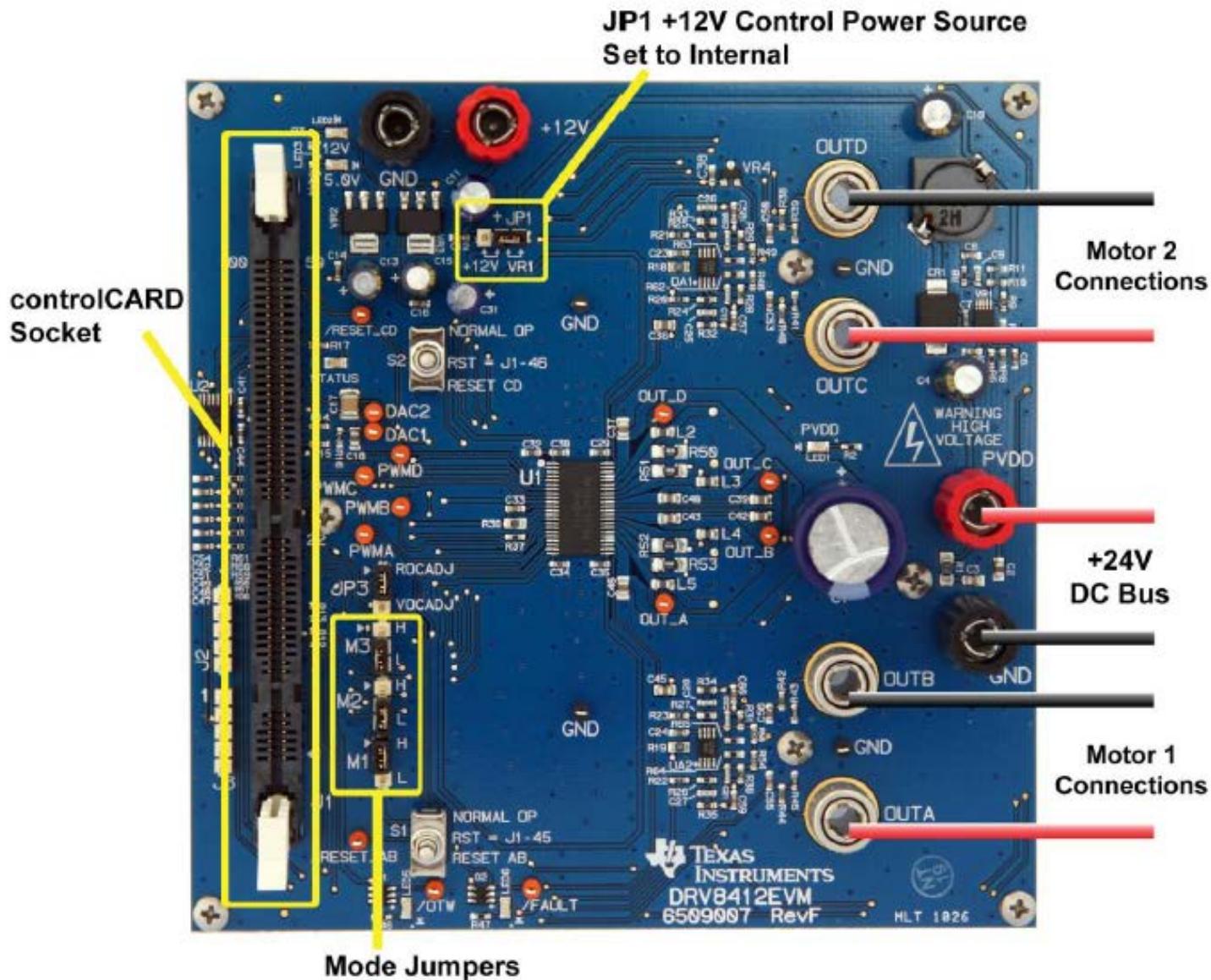


Brushed DC motor
(6-24V, 0.92A)

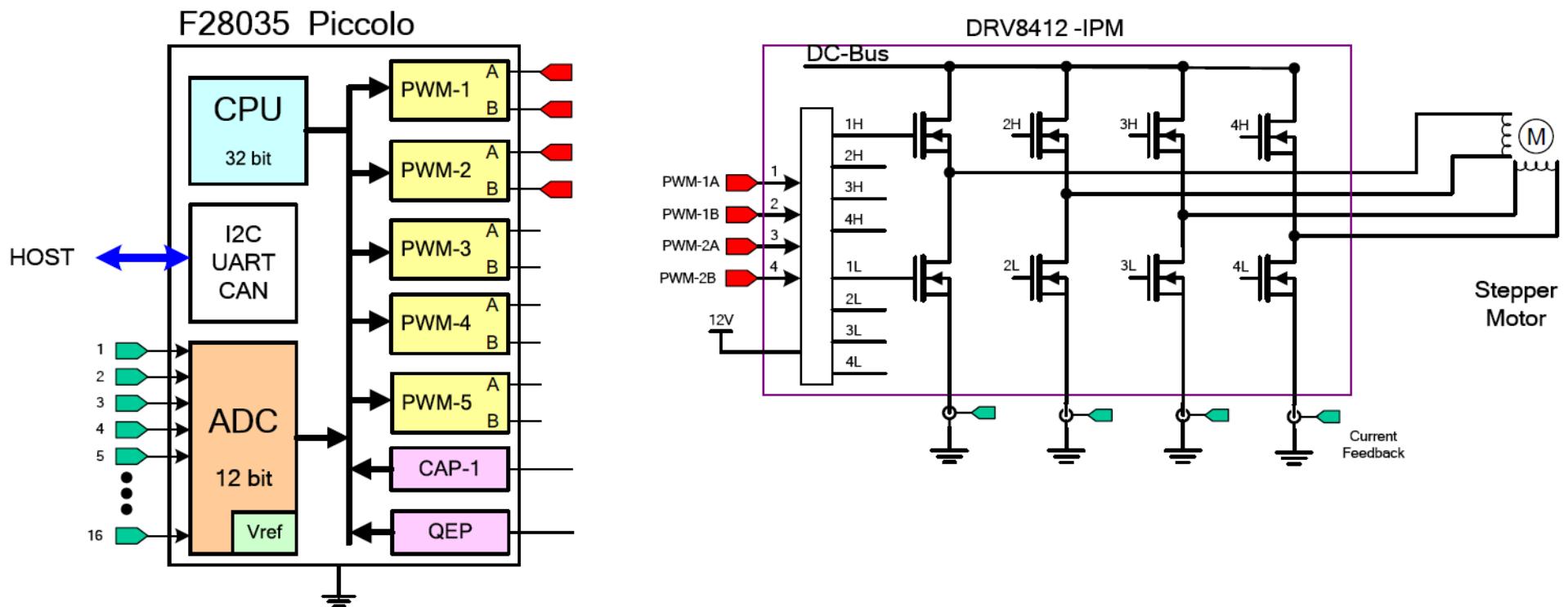
Configuration contrôle de 2 MCC

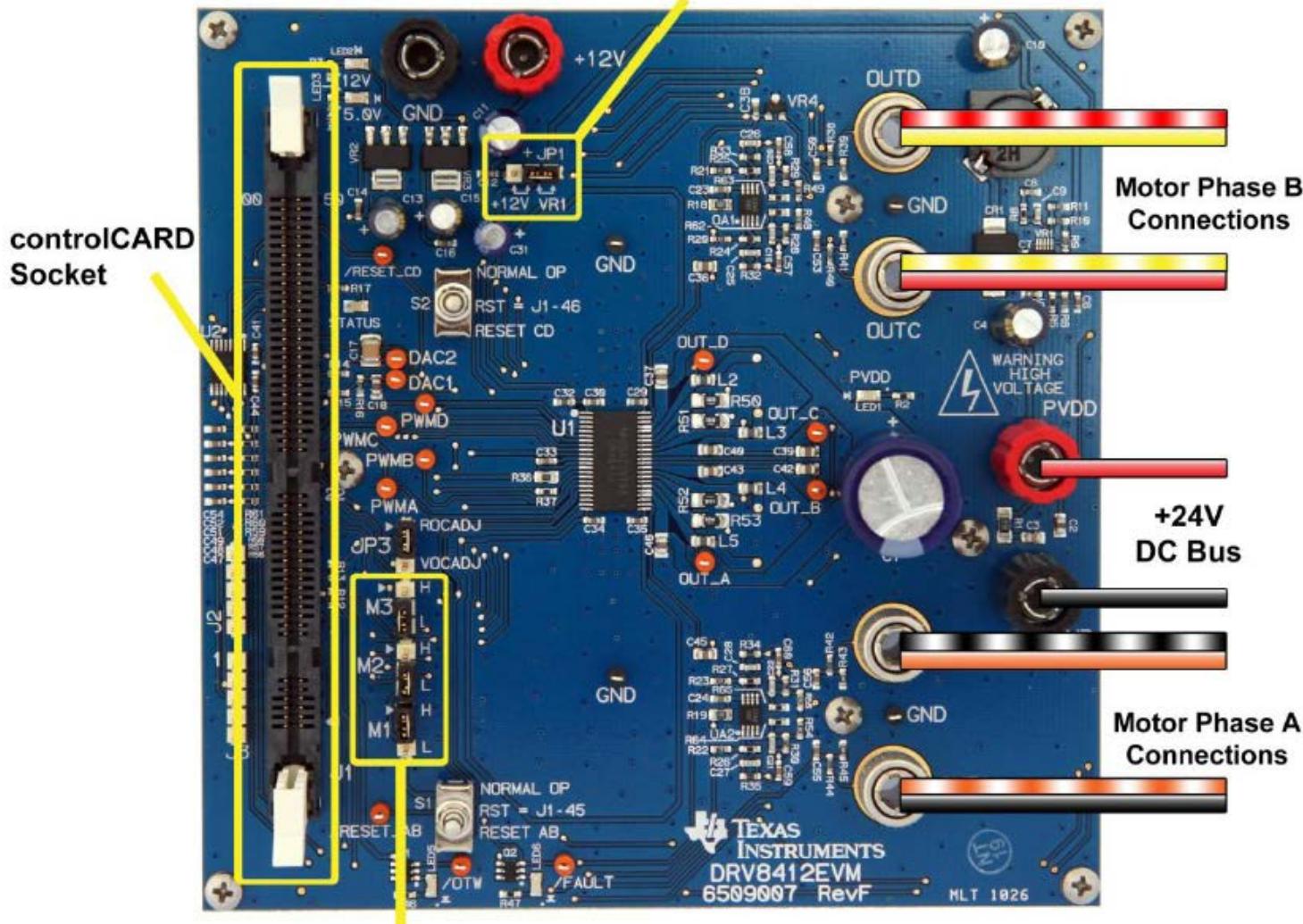


Configuration 2 MCC du DRV8412-C2-KIT



Configuration contrôle de 1 moteur pas à pas





Mode Jumpers

Set:

M3 L

M2 L

M1 H

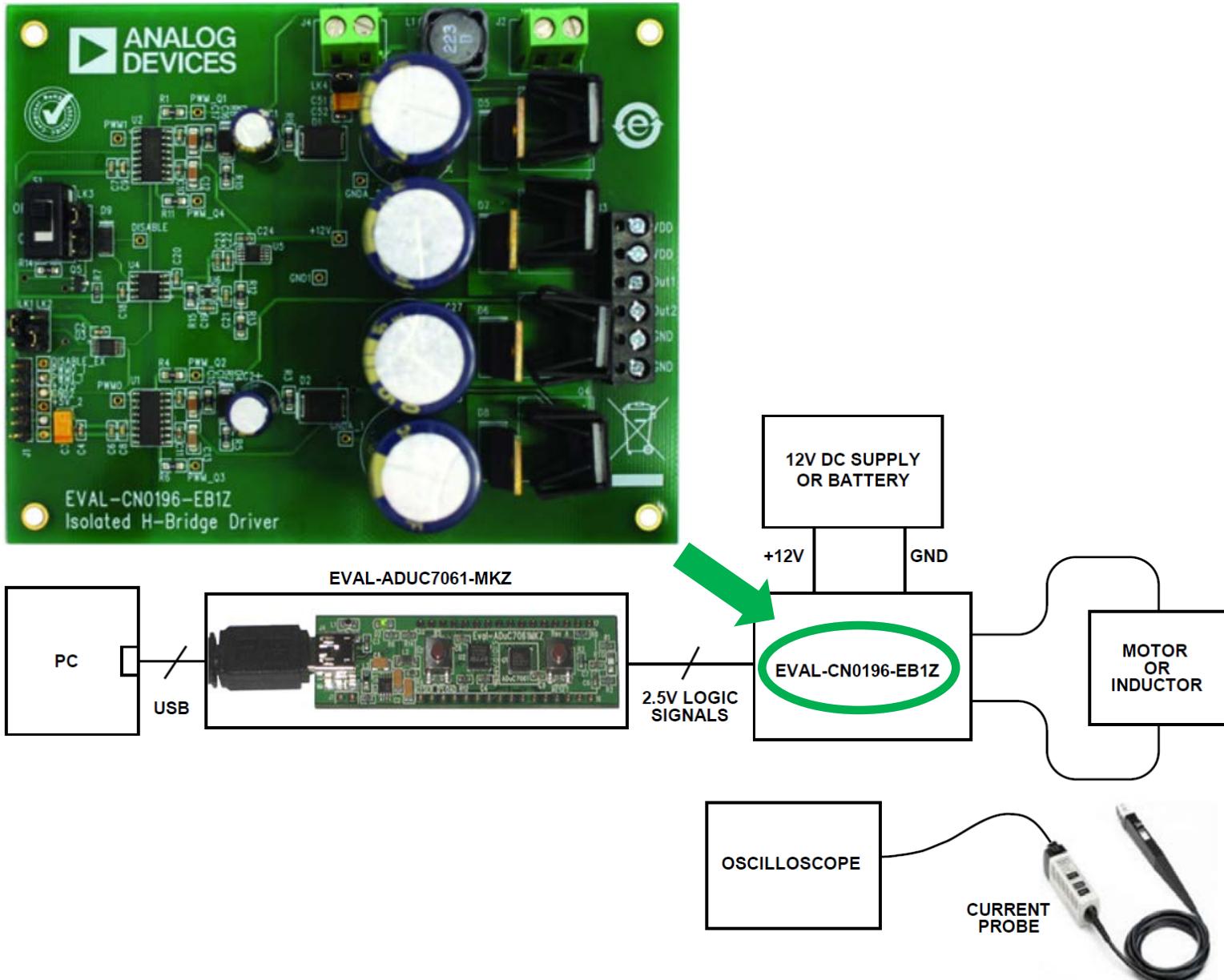


Figure 4. Functional Block Diagram of Test Setup

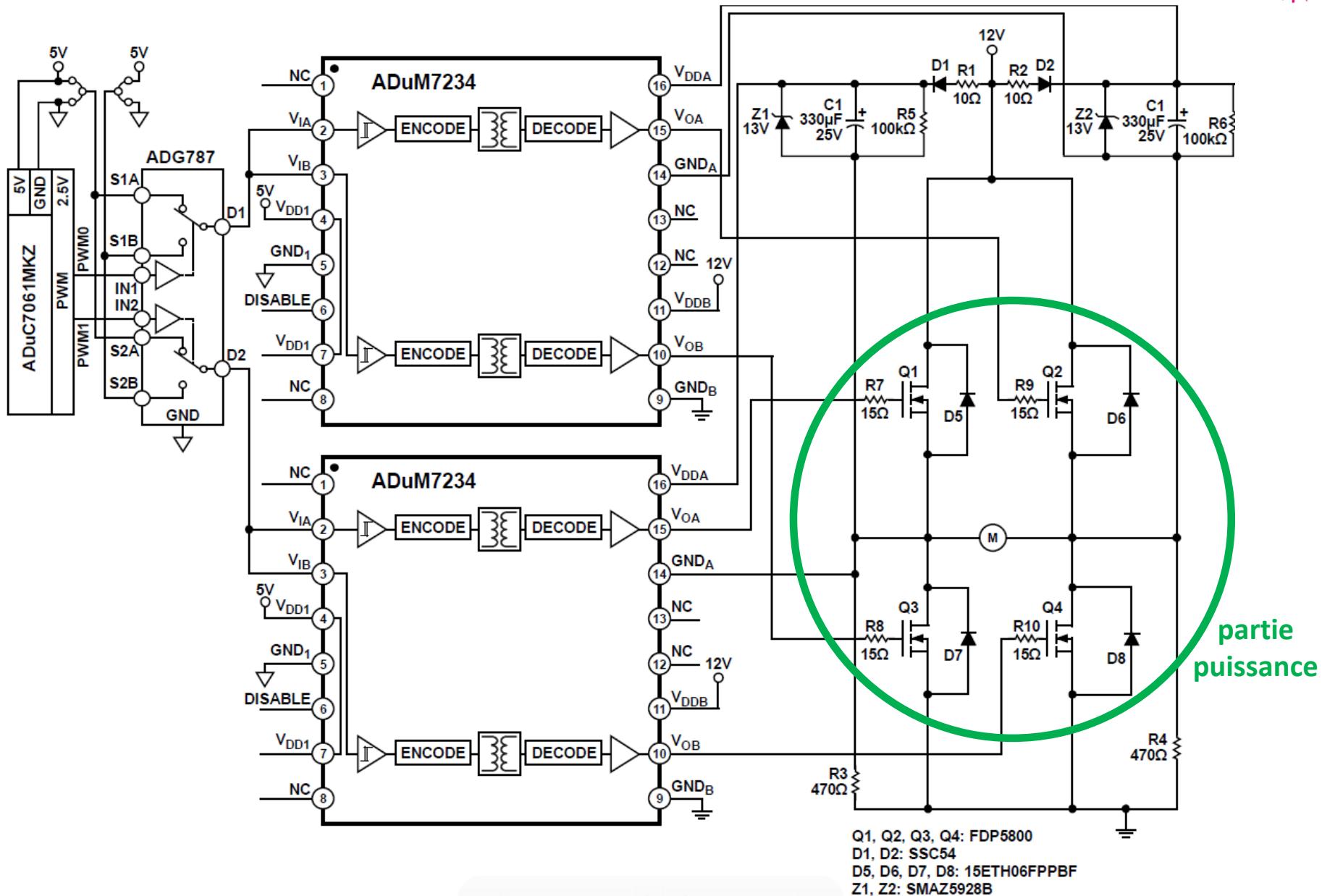


Figure 1. H-Bridge Using ADuM7234 Isolated Half-bridge Driver (Simplified Schematic: All Connections and Decoupling Not Shown)

- PORTESCAP <http://www.portescap.com>
- CROUZET <http://www.crouzet.com>
- PARVEX <http://www.parvex.com>
- PARKER <http://www.parker.com>
- LEROY SOMER <http://www.leroy-sommer.com>
- LENZE <http://www.lenze.fr>
- CANTONI <http://www.cantoni.com>
- SIEMENS <http://www.siemens.com>
- SILMACH <http://www.silmach.com>
- LINTMOT <http://www.LinMot.com>
- THINXSS <http://www.thinxss.com>
- FAULHABER <http://www.faulhaber-group.com>
- MICROPULSE <http://www.micropulsesystems.com>
- NANOMOTION <http://www.nanomotion.com>
- BURLEIGH Instruments <http://www.burleigh.com>
- NOLIAC <http://www.noliac.com>

Electronique de Puissance (EP)

Ensemble des techniques permettant de traiter l'énergie électrique de moyenne et forte puissance

Gamme 100mW – 100MW (courant qq A – qq kA, tension qq V – qq kV)

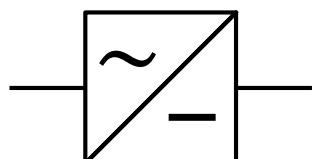
Convertisseur Statique (CS)

Dispositif destiné à modifier la nature de l'énergie électrique et qui s'insère entre deux sources (générateur, récepteur) de natures différentes (continu, alternatif monophasé, triphasé, réversible ou pas, charge ou récepteur passif, actif, réversible ou pas)

Applications : alimentation (50%), variation de vitesse (50%)

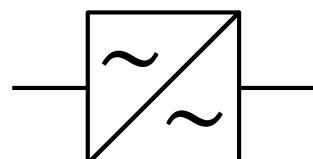
On classe les CS en 4 grandes familles (ci-dessous):

alternatif - continu



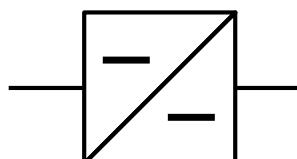
redresseurs

alternatif - alternatif



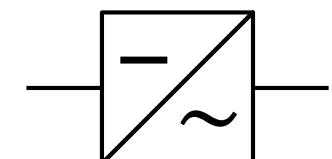
gradateurs
cyclo-convertisseurs

continu - continu



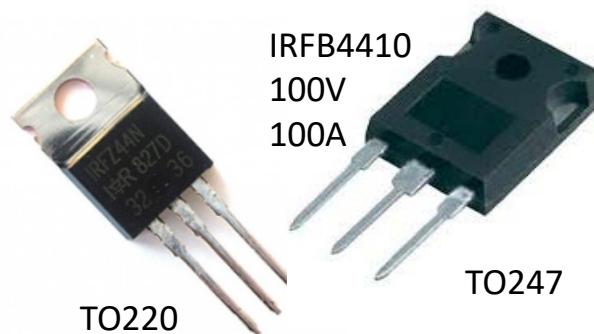
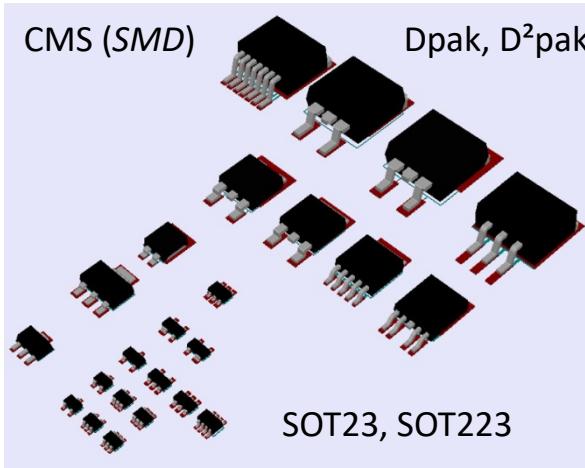
hacheurs

continu - alternatif



onduleurs

Les CS utilisent les composants de l'EP. En dehors des composants passifs (R, L, C), les composants à semi-conducteur de puissance (diodes, thyristors, transistors) jouent le rôle d'interrupteurs. Ils réalisent une application contrôlée des tensions et un aiguillage des courants.



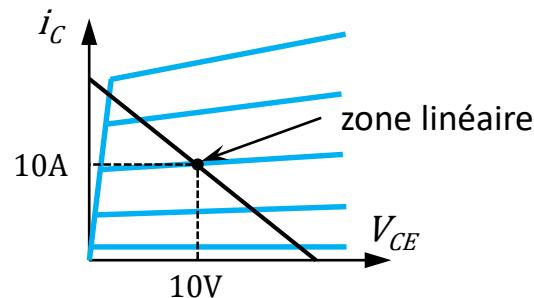
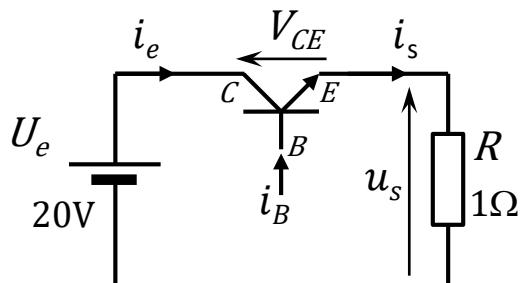
Le semi-conducteur de puissance, dans son rôle d'interrupteur K, peut être dans 3 états:

- état passant, fermé, ON: K laisse passer le courant avec un minimum de chute de tension à ses bornes,
- état bloqué, ouvert, OFF: K bloque la tension à ses bornes en laissant passer le minimum de courant de fuite,
- « En commutation »: K passe de l'état OFF à l'état ON, c'est l'amorçage
K passe de l'état ON à l'état OFF, c'est le blocage

Ces changements d'état peuvent être spontanés ou commandés suivant que l'interrupteur est commandable (eg. transistor) ou pas (eg. diode).

Par extension de langage, pour l'ensemble, on parle de fonctionnement « en commutation »

Alimentation linéaire (à transistor ballast)



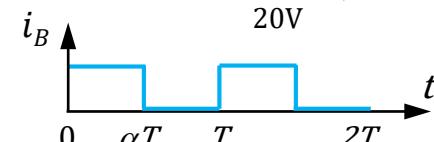
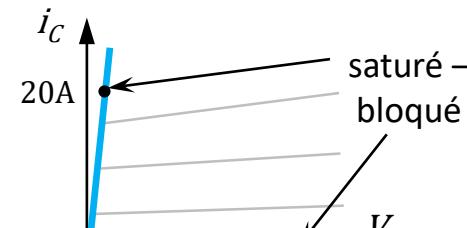
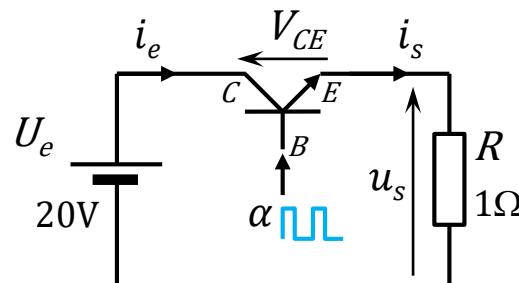
$$P_e = \langle u_e i_e \rangle = U_e I_e = 200 \text{ W}$$

$$P_{Tr} = \langle v_{CE} i_C \rangle = V_{CE} I_C = 100 \text{ W}$$

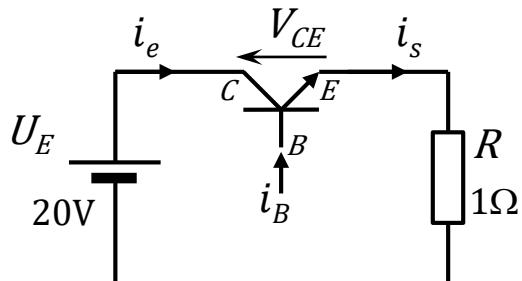
$$P_s = \langle u_s i_s \rangle = U_s I_s = 100 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = 50\%$$

Alimentation à découpage (SMPS)



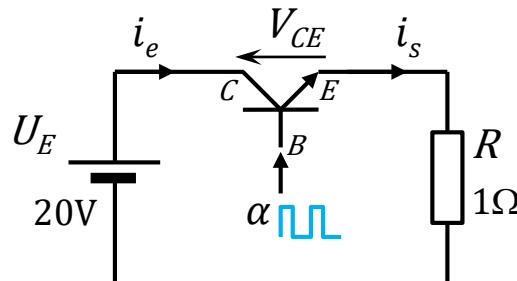
Alimentation linéaire (à transistor ballast)



$$P_e = 200 \text{ W}, P_{Tr} = 100 \text{ W}, P_s = 100 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = 50\%$$

Alimentation à découpage (SMPS)



$$P_e = 200 \text{ W}, P_{Tr} = 0 \text{ W}, P_s = 200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = 100\%$$

Intérêt du fonctionnement « en commutation »

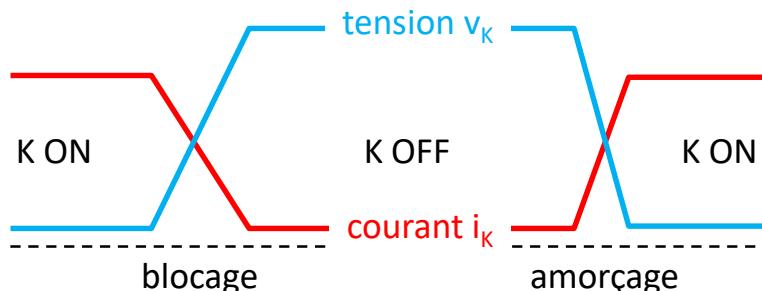
Rendement considérablement meilleur

Grande possibilité de réglage puisque la puissance dissipée dans le ballast ne limite plus

Limites liées à l'interrupteur réel

Contraintes statiques liées aux résistances R_{ON} et R_{OFF}
 ➔ Pertes par conduction

Contraintes dynamiques liées à la fréquence d'utilisation
 ➔ Pertes par commutation



L'étude fonctionnelle des CS conduit à des modes de calcul et raisonnement particuliers

Le fonctionnement d'un CS en régime établi est divisé en différentes séquences dont l'ensemble constitue une période de fonctionnement.

Chaque séquence débute par un changement d'état d'un interrupteur

Cela conduit à un nouveau schéma équivalent du circuit et se termine par un nouveau changement d'état.

Les équations différentielles qui interviennent dans cette séquence permettent de quantifier l'évolution des différentes variables d'état (courant dans un inductance, tension aux bornes d'un condensateur) et ainsi de prévoir le prochain changement d'état conduisant à un nouveau schéma équivalent, nouvelles équations.

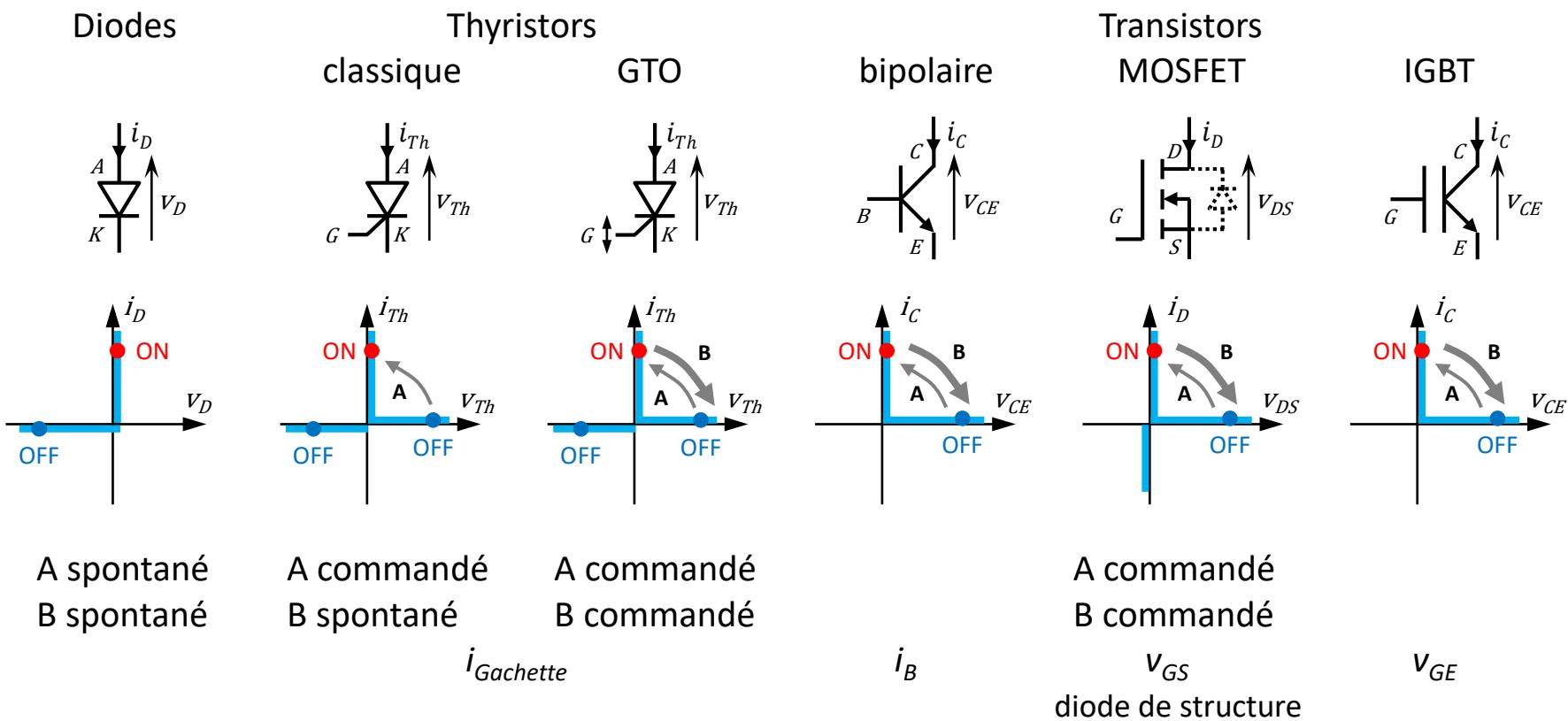
La succession de ces différentes séquences doit conduire à la séquence initiale décrivant ainsi le fonctionnement en régime établi du convertisseur statique qui est fait de la juxtaposition de régimes transitoires.

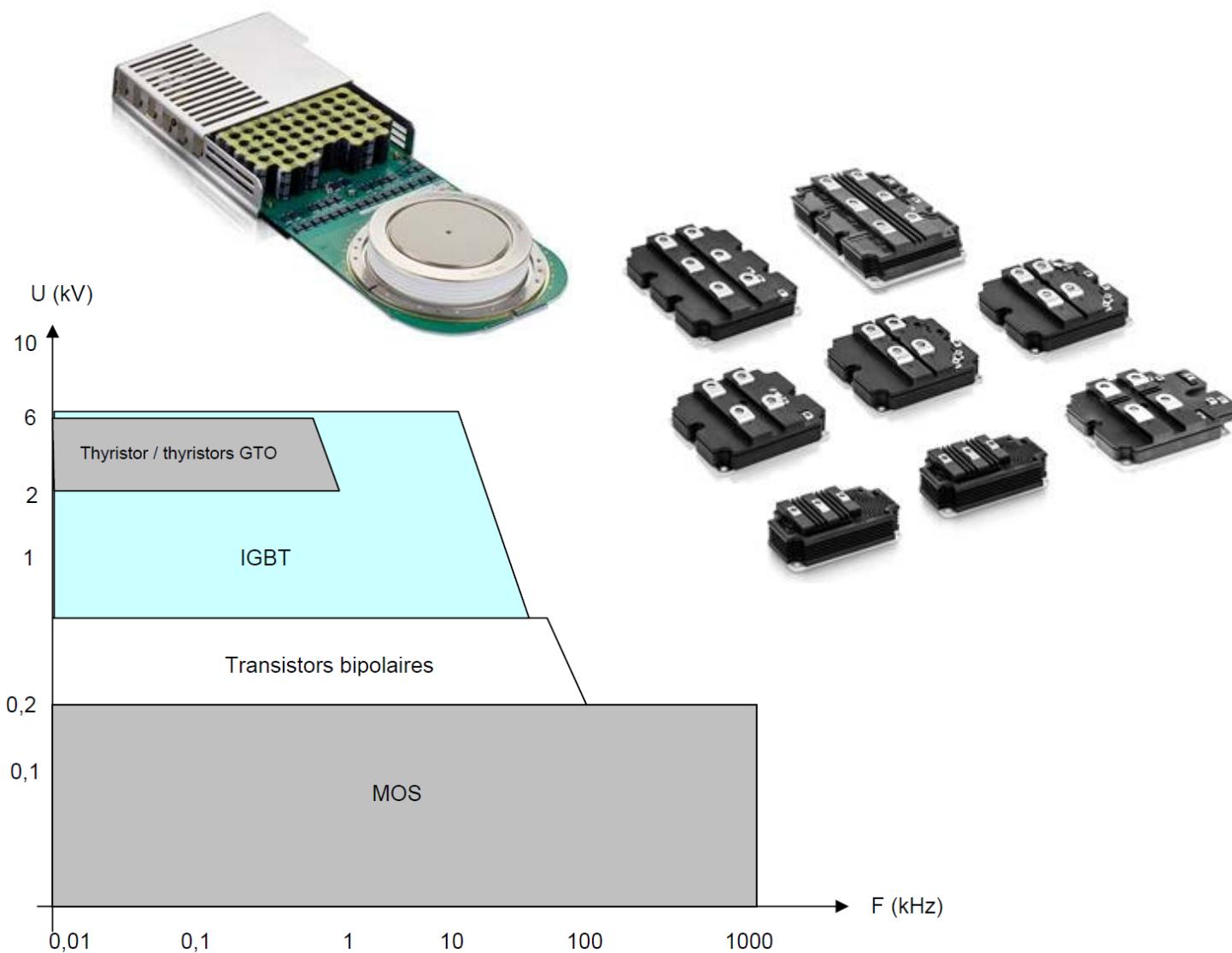
Pour simplifier cette étude, on utilise généralement des hypothèses simplificatrices en considérant comme idéaux les différents composants ie. sources et interrupteurs.

Hypothèse de l'interrupteur parfait K

- état passant : chute de tension nulle $v_K = 0$
 - état bloqué : courant de fuite nul $i_K = 0$
 - commutation instantanée (v_K et i_K ne se croisent pas)
- Pas de pertes par conduction, ni de pertes par commutation

Caractéristiques i_K (v_K) idéalisées: représentation par segments





Définition des sources, notion du dualité

Le terme source désigne aussi bien un récepteur qu'un générateur

Une source de tension impose la tension à ses bornes quelque soit le courant qui la traverse

Une source de courant impose le courant quelque soit la tension à ses bornes

- La tension aux bornes d'un condensateur ne peut pas subir de discontinuité (énergie stockée) → la valeur moyenne du courant traversant un condensateur ,dont la tension est périodique, est nulle
- Le courant dans une inductance ne peut pas subir de discontinuité (énergie stockée) → la valeur moyenne de la tension aux bornes d'un inductance, traversée par un courant périodique, est nulle
- On peut renforcer le caractère « source de tension » d'une source réelle en ajoutant un condensateur en parallèle
- On peut renforcer le caractère « source de courant » d'une source réelle en ajoutant une inductance en série

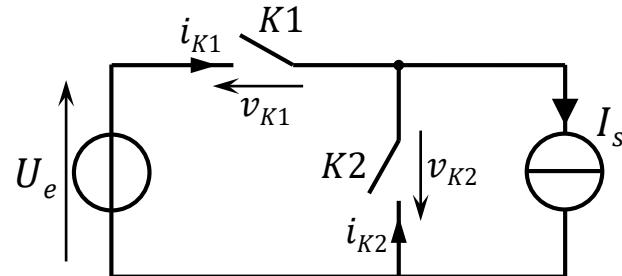
Règles d'interconnexion des sources

- Une source de tension ne doit pas être court-circuitée (elle peut être laissée en CO)
- Une source de courant ne doit pas être laissée en circuit ouvert (elle peut-être mise en CC)
- On ne doit pas connecter deux sources de tensions en parallèle ou deux sources de courant en série
- On ne peut connecter (directement) entre elles que des sources de nature différente (cependant, si l'une des sources est seulement instantanée, on peut la connecter à une autre source de même nature)

Topologie de la cellule de commutation

Le hacheur série (dévolteur, buck) a pour rôle de contrôler le débit d'une source de tension U_e (générateur en entrée) dans une source de courant I_s (récepteur en sortie)

La structure minimale de ce convertisseur statique comporte 2 interrupteurs K1 et K2



- K1 ON et K2 ON → SdT en CC → interdit
- K1 OFF et K2 OFF → SdC en CO → interdit
- ➔ K1 et K2 doivent être complémentaires

- K1 ON et K2 OFF source de tension reliée à la source de courant: phase active (débit)
- K1 OFF et K2 ON source de tension CO, source de courant CC: phase passive (roue libre)

Détermination de la nature des interrupteurs

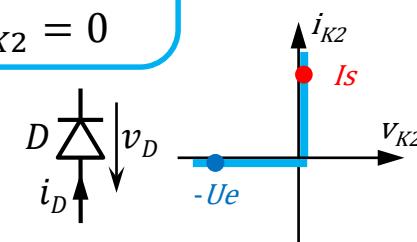
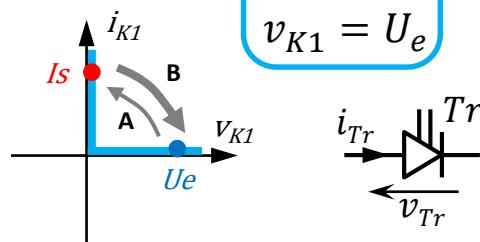
La fermeture de K1 entraîne

$$\begin{aligned} i_{K1} &= I_s \\ v_{K1} &= 0 \\ i_{K1} &= 0 \\ v_{K1} &= U_e \end{aligned}$$

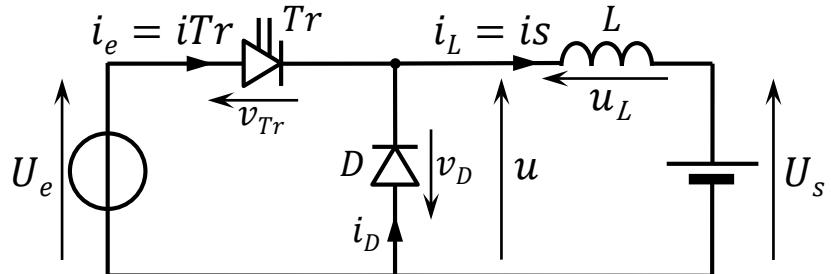
et

$$\begin{aligned} i_{K2} &= 0 \\ v_{K2} &= -U_e \\ i_{K2} &= I_s \\ v_{K2} &= 0 \end{aligned}$$

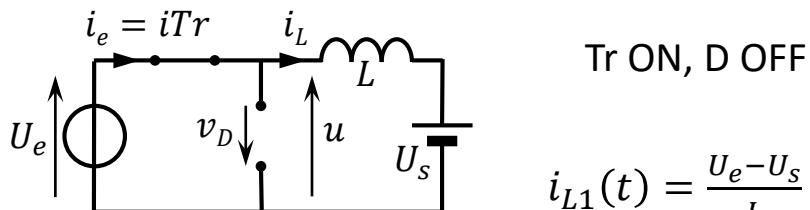
La fermeture de K2 entraîne



Hacheur série en conduction continue

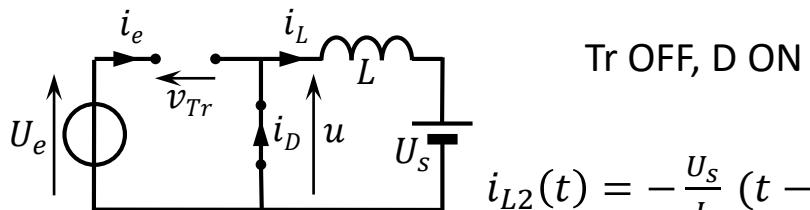


① $0 < t < \alpha T$: phase active, débit de $U_e \rightarrow L + U_s$



$$i_{L1}(t) = \frac{U_e - U_s}{L} t + I_{min}$$

② $\alpha T < t < T$: phase roue libre, U_e CO, $L + U_s$ CC

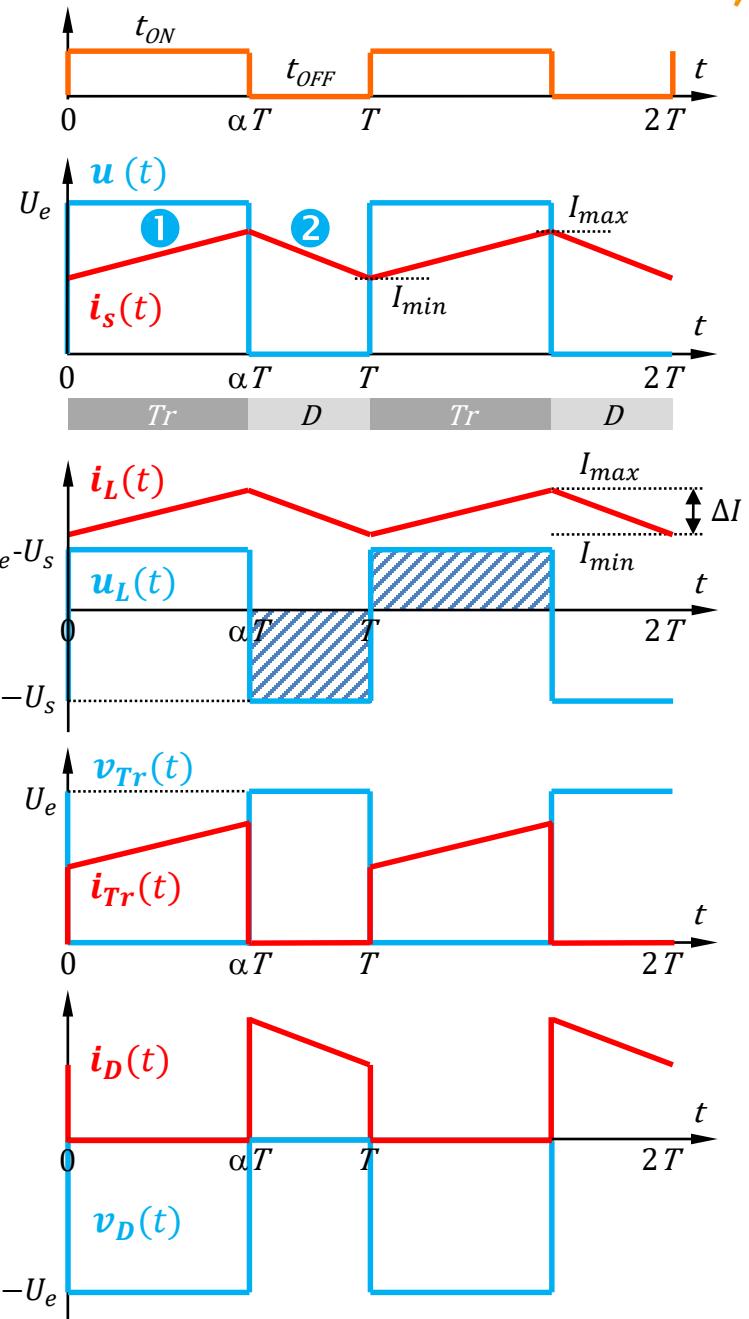


$$i_{L2}(t) = -\frac{U_s}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

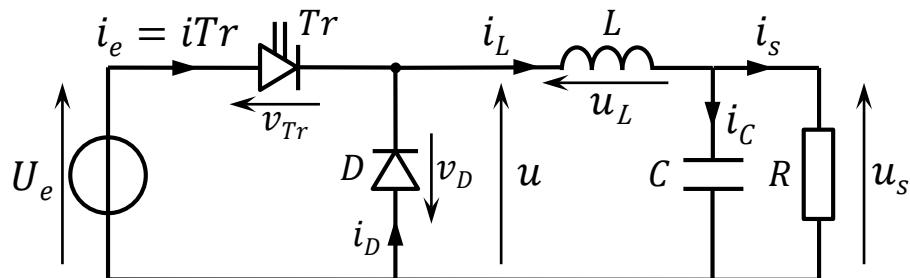
Sortie indépendante de la charge $\langle u \rangle = U_s = \alpha U_e$

Rapport de conversion continu $m = \frac{U_s}{U_e} = \alpha$

Ondulation du courant de sortie $\Delta I = \frac{\alpha(1-\alpha)U_e}{L_f}$

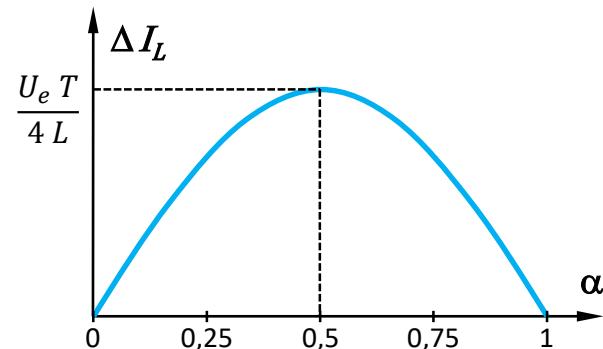


7 Hacheur série réaliste en conduction continue



Notations : $i_L(t) = \langle i_L \rangle + \delta i_L(t)$

$u_s(t) = \langle u_s \rangle + \delta u_s(t)$



Ondulation du courant dans l'inductance

$$\Delta I = \frac{\alpha(1-\alpha)U_e}{L f}$$

Ondulation de la tension de sortie

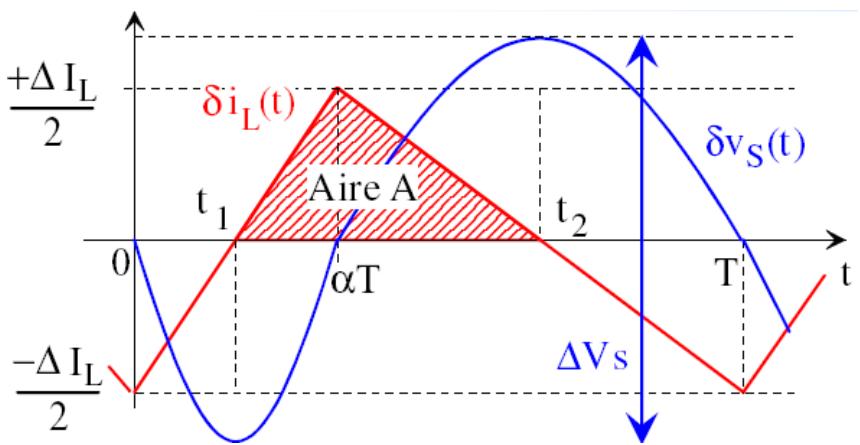
Hypothèse : courant constant dans la charge (faible ondulation de tension aux bornes de R)

→ δu_s produite par δi_L

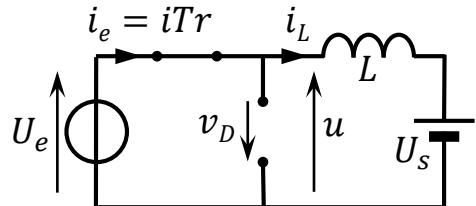
$$i_C = \delta i_L = C \frac{d(\delta u_s)}{dt}$$

$$\Delta U_s = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} \delta i_L dt = \frac{\Delta I_L}{8 C f}$$

$$\Delta U_s = \frac{\alpha(1-\alpha)U_e}{8 L C f^2}$$



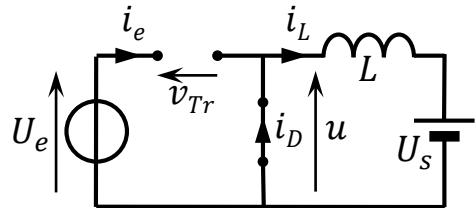
① $0 < t < \alpha T$: phase active, débit de $U_e \rightarrow L + U_s$



Tr ON, D OFF

$$i_{L1}(t) = \frac{U_e - U_s}{L} t$$

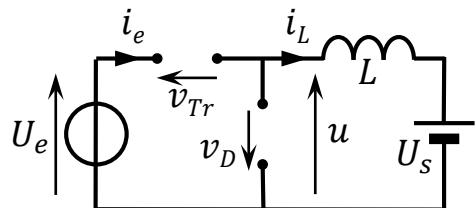
② $\alpha T < t < \beta T$: phase roue libre, U_e CO, $L + U_s$ CC



Tr OFF, D ON

$$i_{L2}(t) = -\frac{U_s}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

③ $\beta T < t < T$: phase passive, sans énergie ni débit



Tr OFF, D OFF

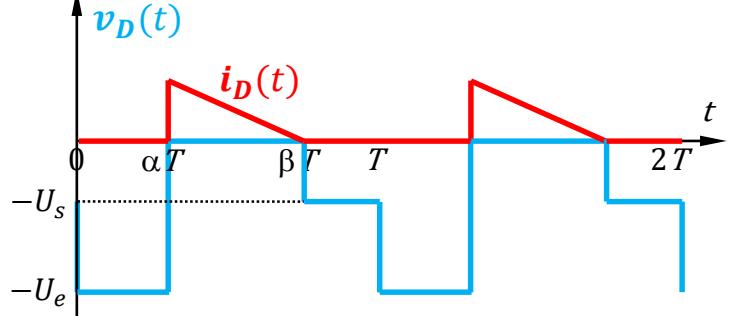
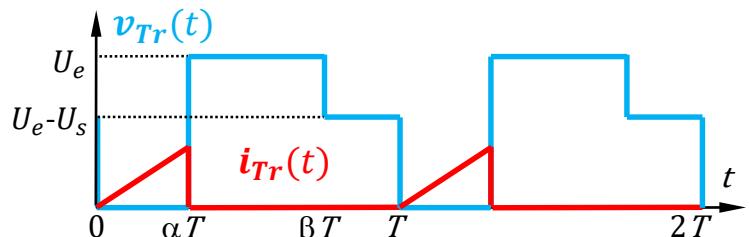
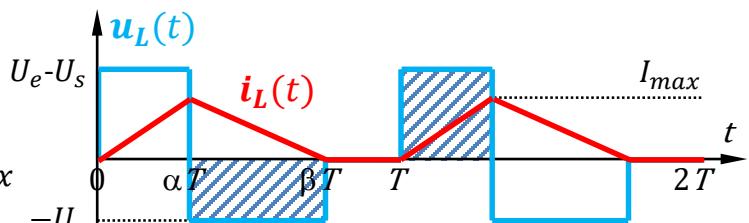
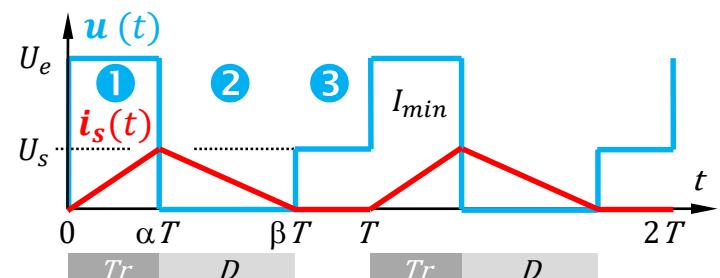
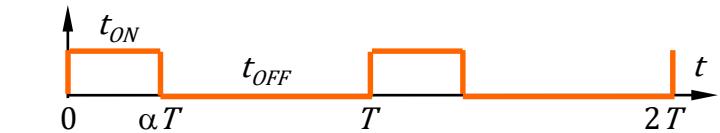
$$i_{L3}(t) = 0$$

Sortie dépendante de la charge au travers de β

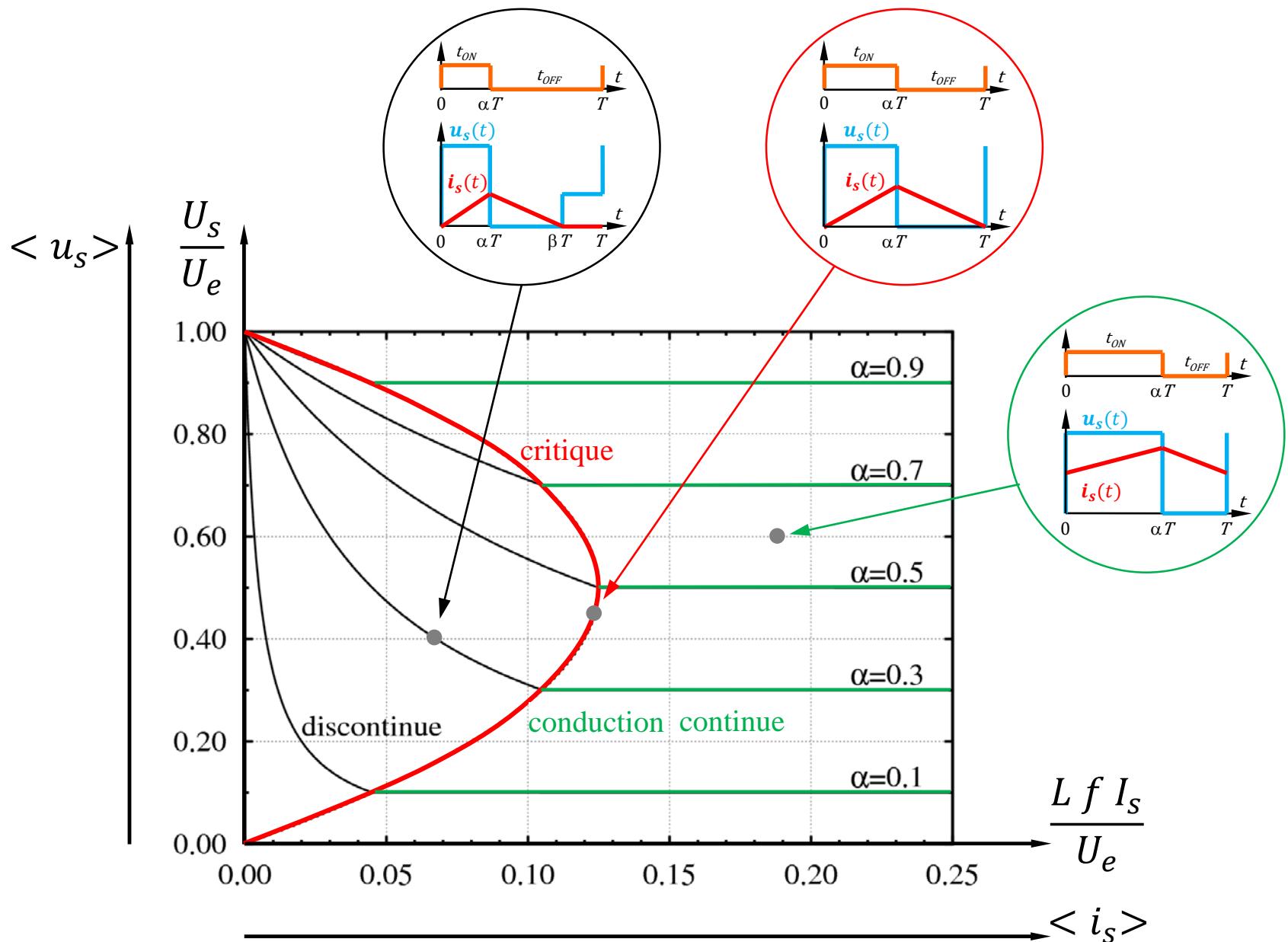
$$\langle u \rangle = \alpha U_e + (1 - \beta) U_s$$

Rapport de transformation continu $m = \frac{U_s}{U_e} = \frac{\alpha}{\beta}$

Ondulation du courant de sortie $\Delta I = \frac{\alpha (U_e - U_s)}{L f}$



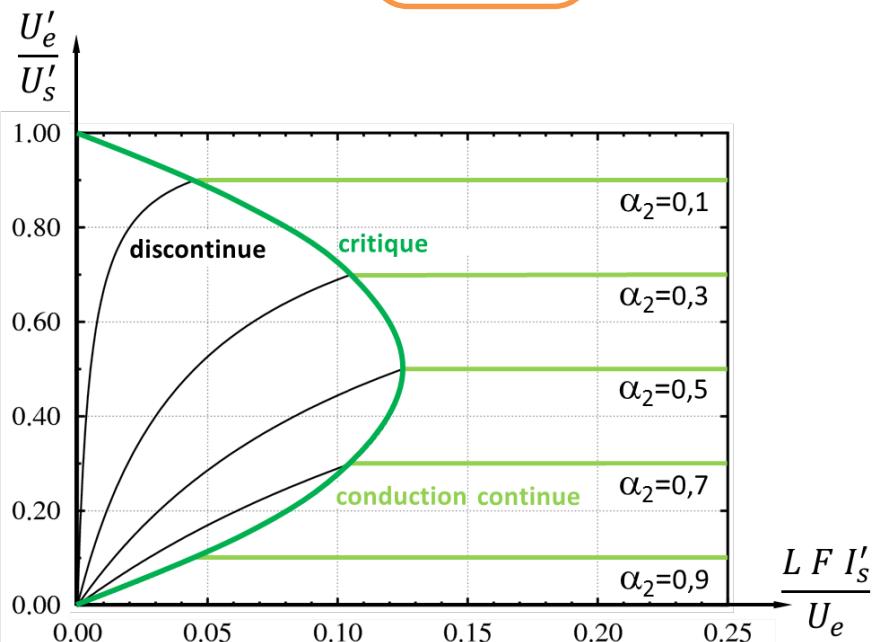
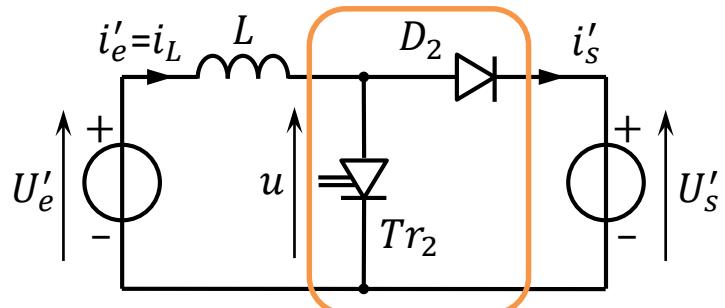
Caractéristique de sortie du hacheur série



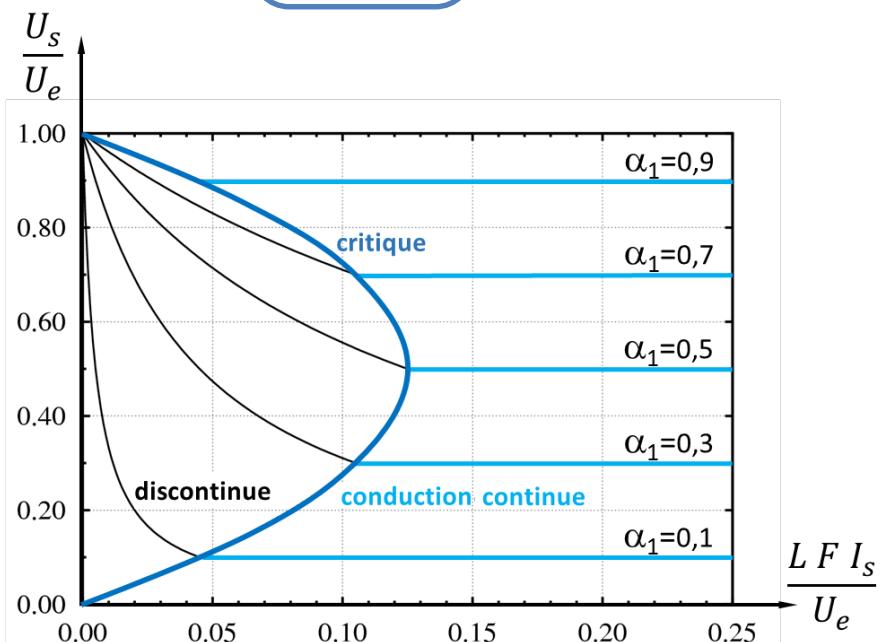
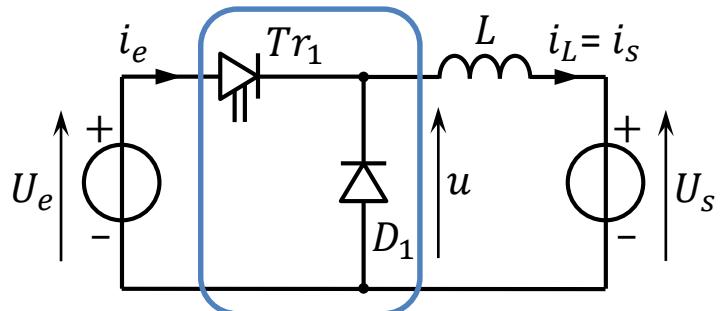
$$\frac{L f I_s}{U_e}$$

$$\langle i_s \rangle$$

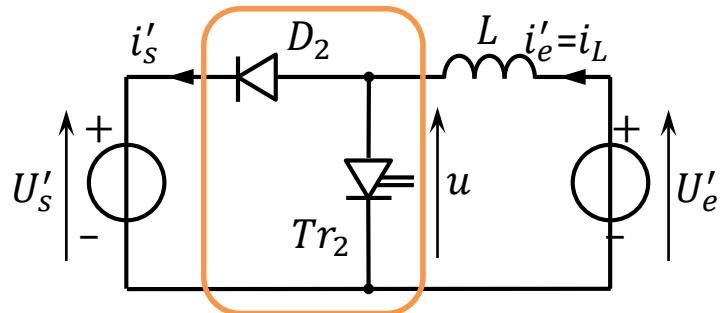
Configuration Boost



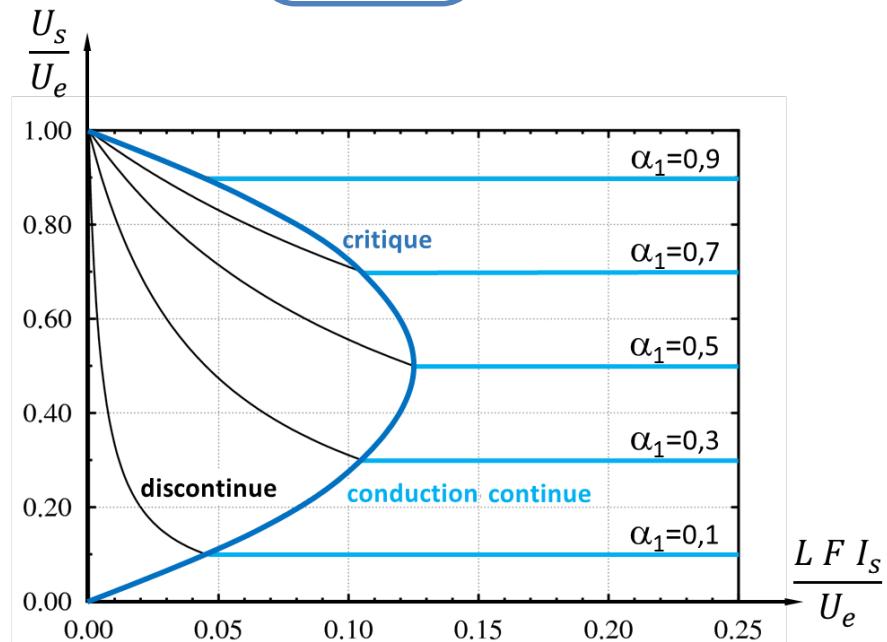
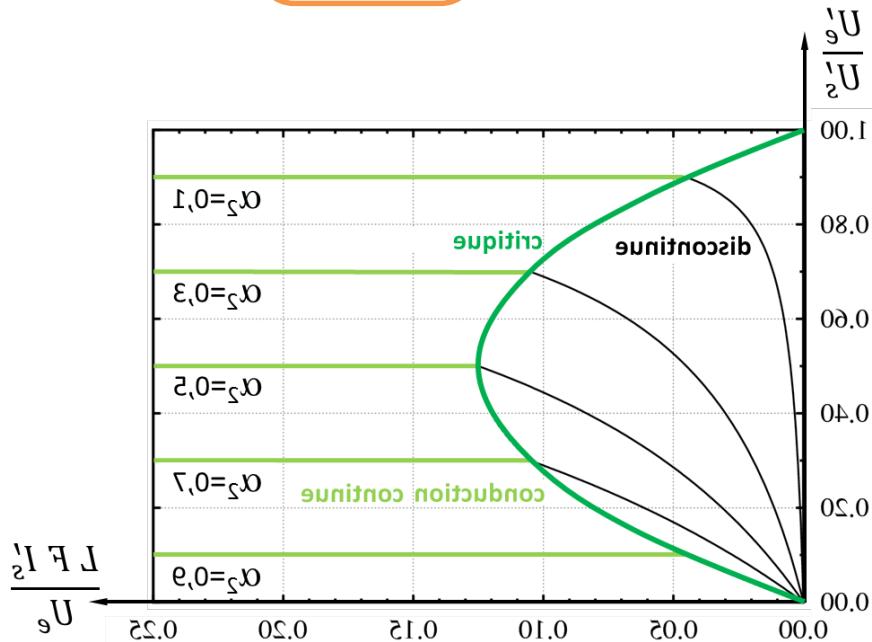
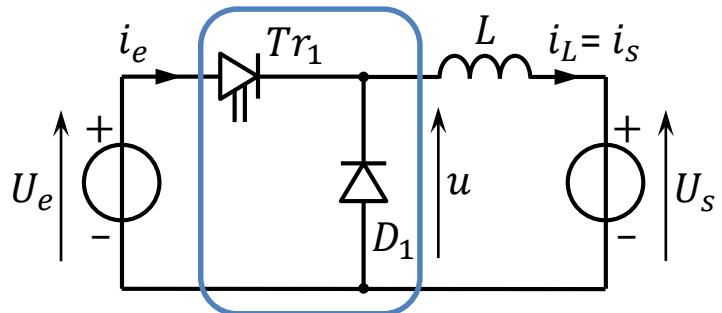
Configuration Buck

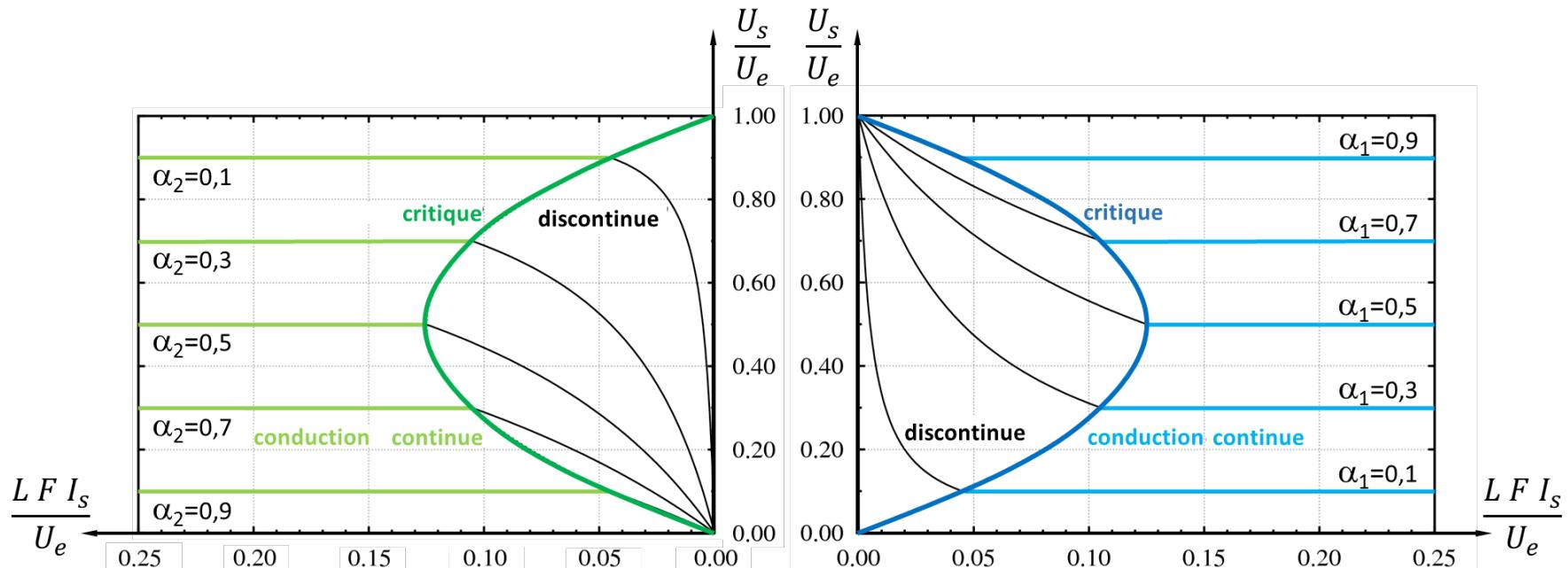
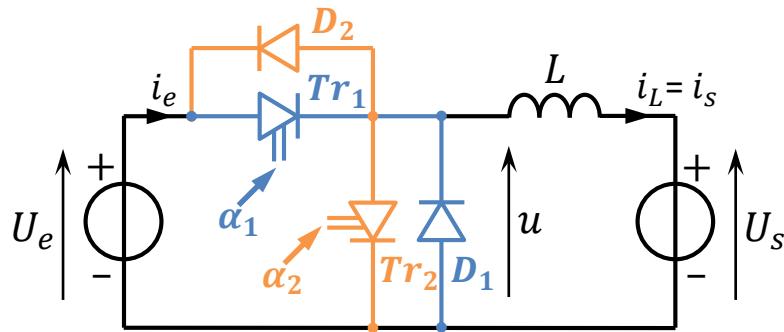


Configuration Boost

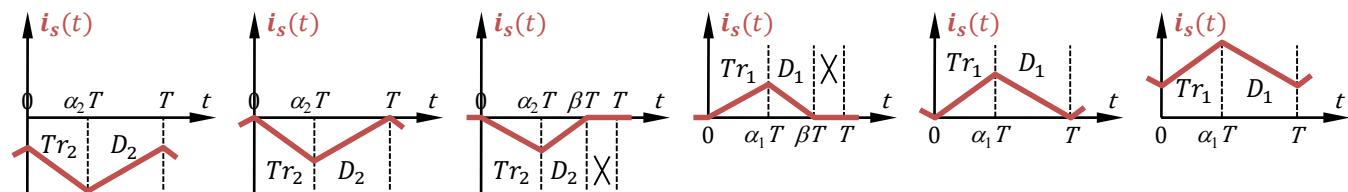
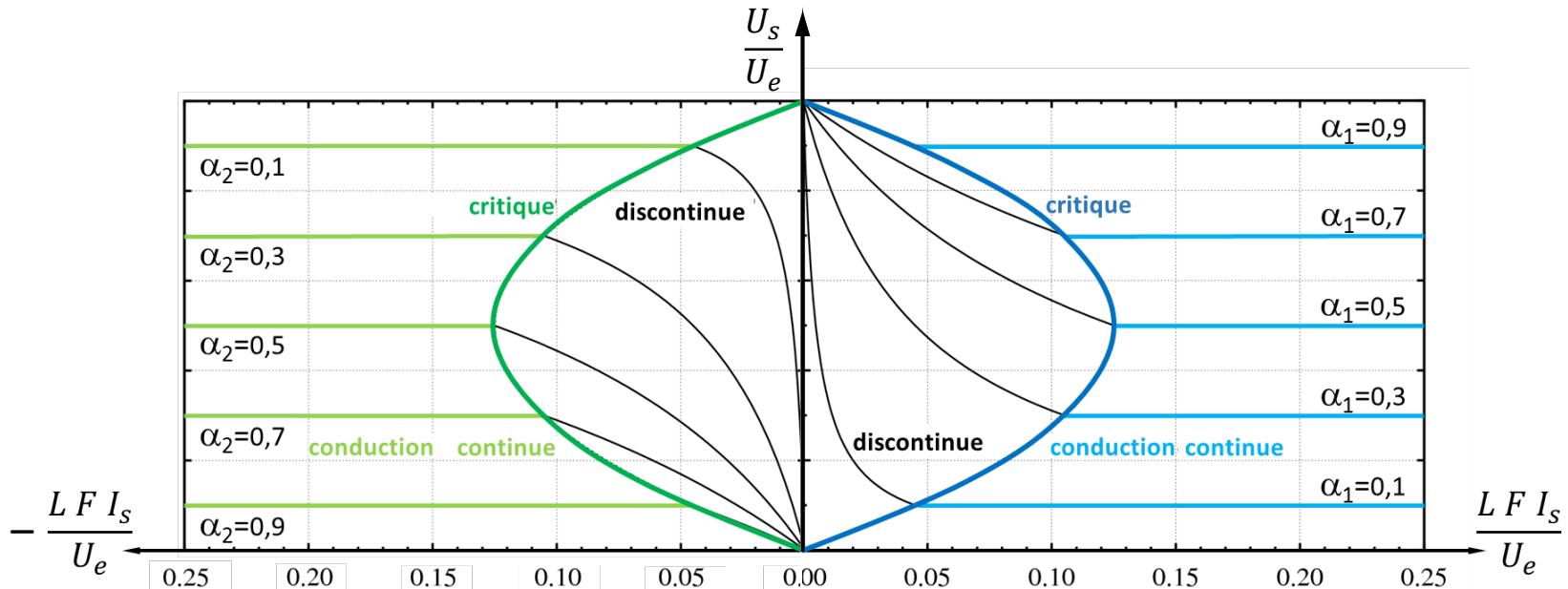
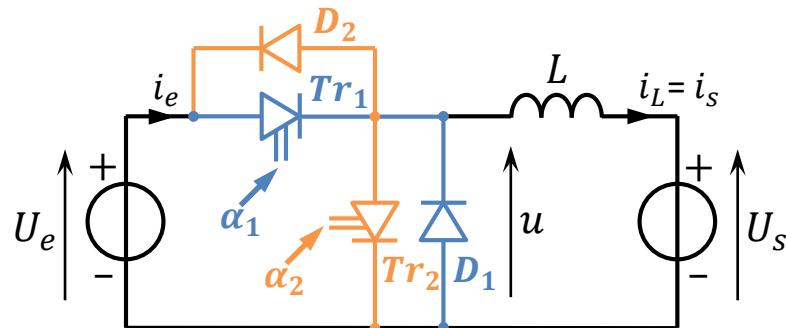


Configuration Buck

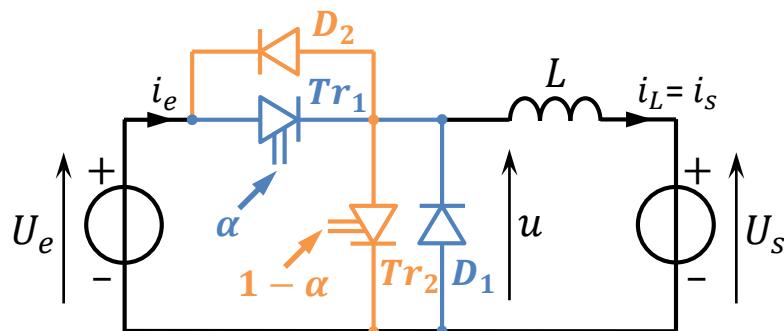




Hacheur réversible en courant ou 2Q



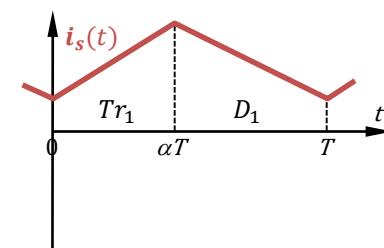
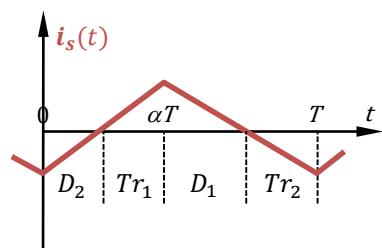
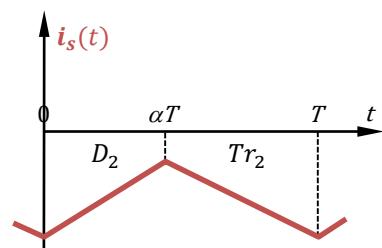
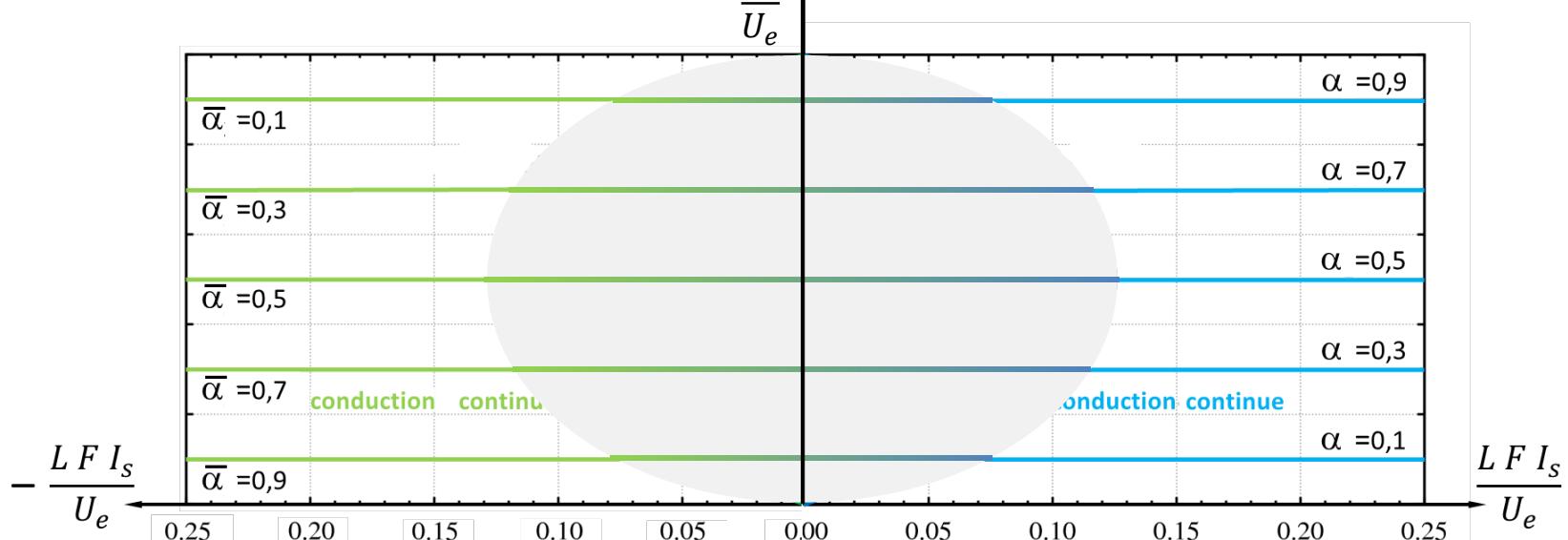
Hacheur réversible en courant ou 2Q

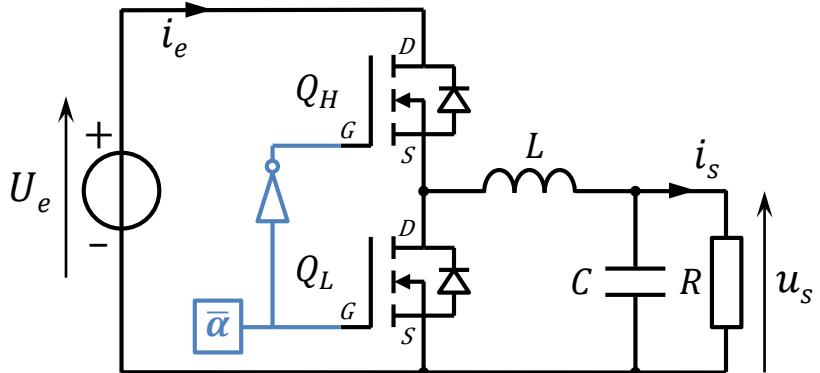
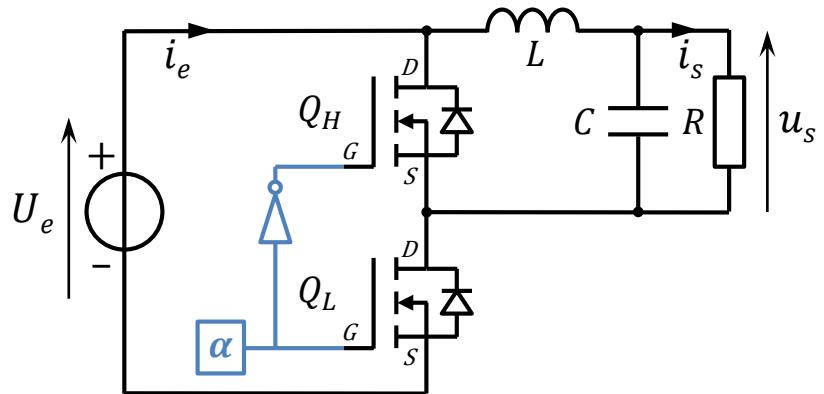


Commande complémentaire:

$$\alpha_1 = \alpha \text{ et } \alpha_2 = 1 - \alpha = \bar{\alpha}$$

Le courant dans l'inductance franchit continument l'axe y=0





Omniprésence

Réversibilité en courant intéressante pour renvoyer de l'énergie vers la source (si elle est réversible, e.g. batterie)

Variateur 2Q (2 quadrants) pour machine à courant continu

Bras de hacheur pont en « H »

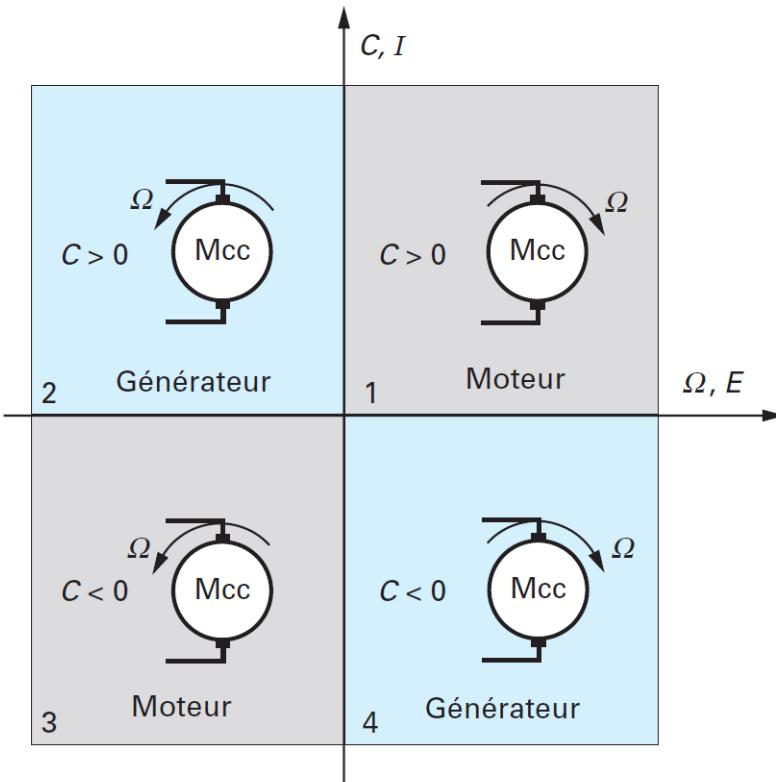
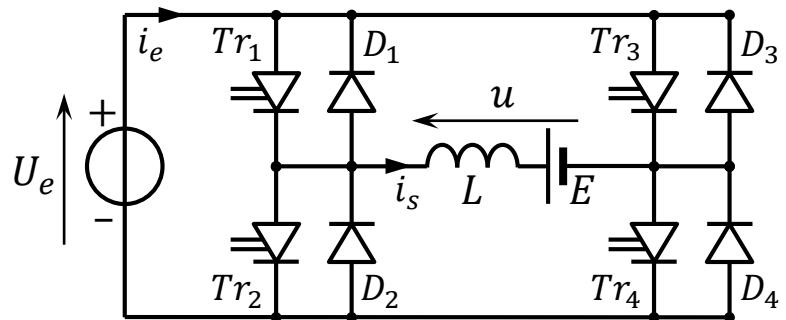
Bras d'onduleur monophasé, triphasé

Problématique et solutions

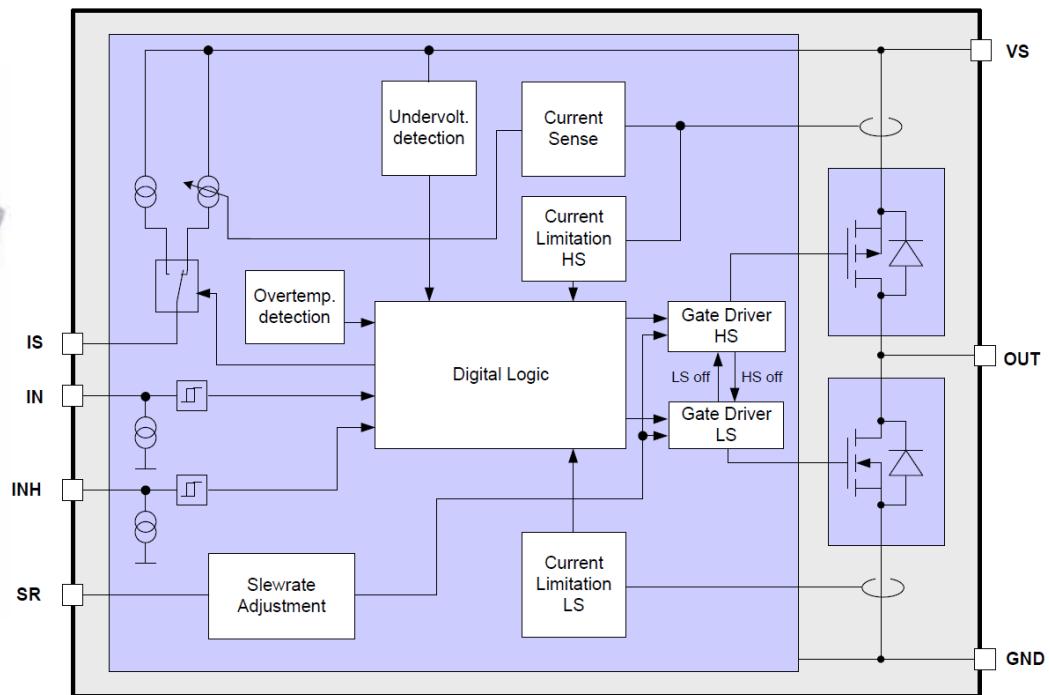
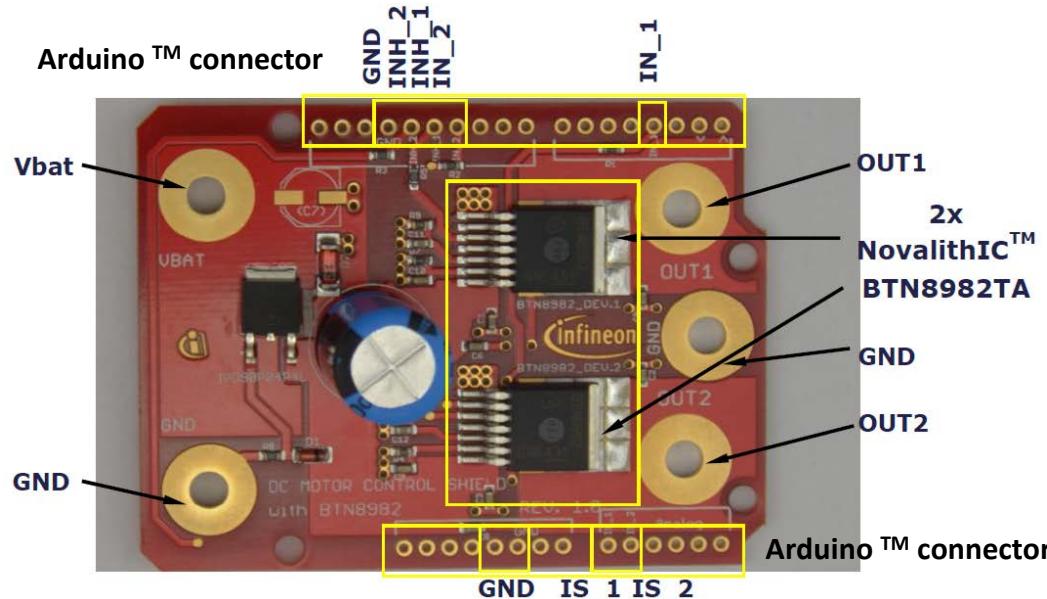
Complémentarité non idéale → introduction de « temps morts »

Prémices du principe de redressement synchrone (conduction du Mosfet en inverse)

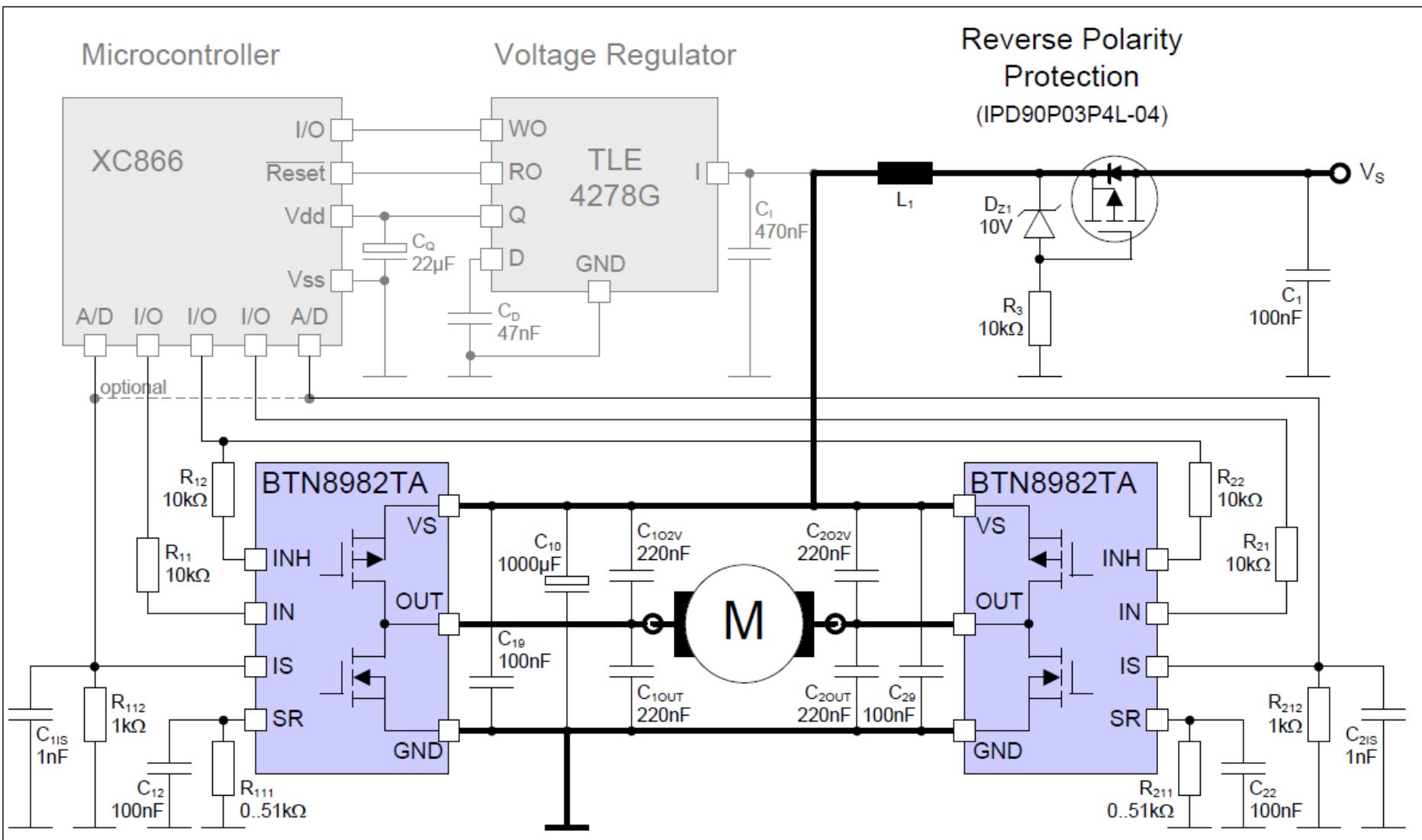
7 Hacheur réversible en courant et en tension ou 4Q



Motor Control Shield with BTN8982TA Infineon



7 Motor Control Shield with BTN8982TA Infineon



The BTN8982TA is an integrated high current half-bridge for motor drive applications. It is part of the NovalithIC™ family containing one p-channel high-side MOSFET and one n-channel low-side MOSFET with an integrated driver IC in one package.

Due to the p-channel high-side switch the need for a charge pump is eliminated thus minimizing EMI.

Interfacing to a microcontroller is made easy by the integrated driver IC which features logic level inputs, diagnosis with current sense, slew rate adjustment, dead time generation and protection against overtemperature, undervoltage, overcurrent and short circuit.

The BTN8982TA provides a cost optimized solution for protected high current PWM motor drives with very low board space consumption.

Key benefits

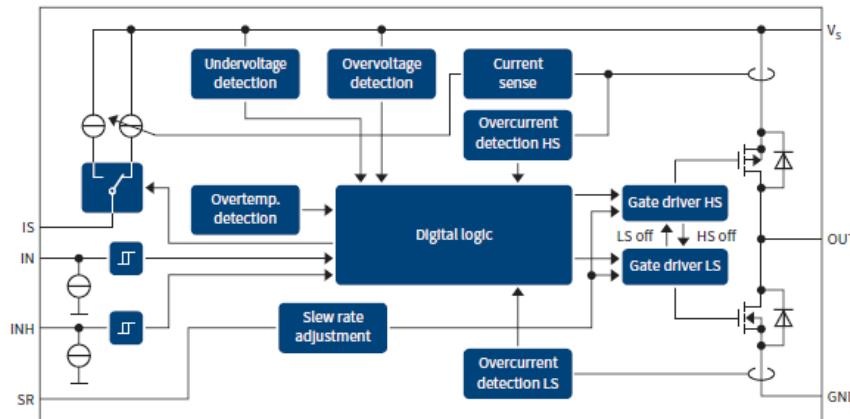
- › **Easy to use and fast design-in** – driver, FETs, load current sensing and diagnostic and protection functions – all integrated in one package, promoting fast and lean design-in activities
- › **Full flexibility** – the BTN8982TA supports BDC motors in half- or H-bridge configuration as well as BLDC motors
- › **Cost optimized through system level savings** – compared to a discrete solution, the BTN8982TA saves PCB-area and pick and place costs. Furthermore it requires less passives due to its integrated diagnosis and protection functions.
- › **Functional safety** – the BTN8982TA includes an integrated under voltage, MOSFETs' overtemperature- and overcurrent protection, measured directly in the MOSFETs. In an H-bridge configuration, the BTN8982TA furthermore provides a redundancy case for functional safety.
- › **Configuration flexibility** – settable switching speed for optimized EMI vs. power dissipation

Performance BTN8982TA

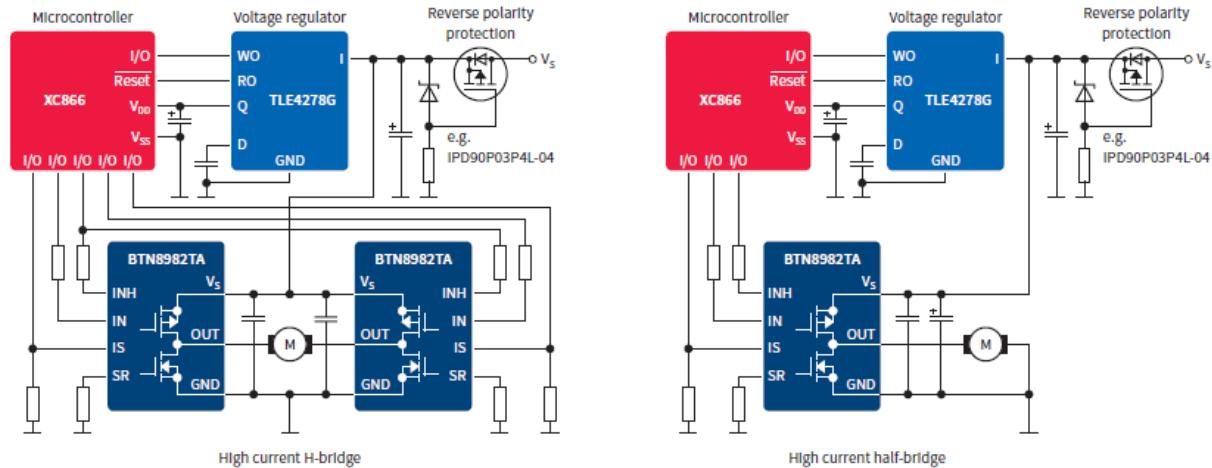
Key features

- › Path resistance: max. 20.4 mΩ at 150°C (typ. 10.0 mΩ at 25°C)
 - High side: max. 10.5 mΩ at 150°C (typ. 5.3 mΩ at 25°C)
 - Low side: max. 9.9 mΩ at 150°C (typ. 4.7 mΩ at 25°C)
- › Capable for high PWM frequency combined with active freewheeling
- › Extended operating voltage range down to 5.5 V (high side switch) and up to 40 V
- › Current limitation level of 55 A min.
- › Status flag diagnosis with current sense capability
- › Overtemperature shut down with latch behavior and undervoltage shut down
- › Driver circuit with logic level inputs
- › Green product (RoHS compliant)
- › AEC-qualified

Block diagram



Applications diagram



Applications: high current DC- or brushless DC (BLDC) motor drives for use in applications like:

- › Power windows
- › Sun roof
- › Central door lock
- › Seat positioning
- › Front and rear wiper
- › 4 wheel transfer case
- › Electronically Controlled Manual Transmission (ECMT)
- › Cooling fan / HVAC blower
- › Seat belt pretensioner
- › Electric parking brake
- › Sliding door/door soft close
- › Power lift gate
- › Fuel pump / water pump
- › Industrial motor drives (automation, home appliance, robotics, medical)