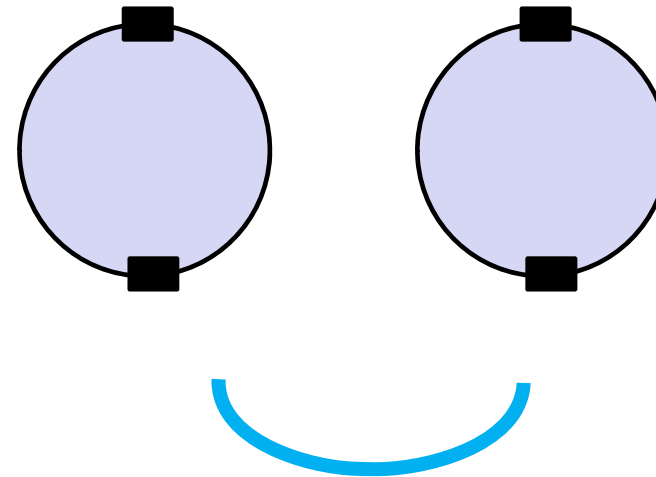


Actionneurs

Dr. Ing. Mohamed Bouri

IEEE Senior Member

EPFL, Laboratoire de Systèmes Robotiques



Actionneurs

- **Electrohydrauliques**
- **Electropneumatiques**
- **Electromécaniques.**

Actionneurs hydrauliques

Monopole dans le domaine de la **robotique industrielle lourde** avec les avantages suivants

- un rapport puissance/poids élevé (**supérieur à 1 kW par kg pour une pression de 100 bar**);
- des constantes de temps très faibles permettant d'excellentes performances en vitesse et accélération;
- la **quasi-incompressibilité** des fluides conduisant à **une raideur élevée**.

Ses inconvénients majeurs sont:

- le **coût élevé**, déterminé par le **groupe hydraulique** et certains composants tels que les **servovalves**.

Pour éviter des fuites, les usinages et le montage doivent être d'excellente qualité, donc nécessairement coûteux;

- **l'encombrement** (tuyaux, raccords, ...) et le dimensionnement délicat des actionneurs, particulièrement ceux de petites dimensions;
- le **danger de fuite d'huile** en cas de rupture d'un conduit;
- **l'incompatibilité de l'huile avec l'industrie alimentaire** (des huiles spéciales doivent être employées)
- le **bruit généré** par le groupe hydraulique.

Actionneurs hydrauliques

Il existe des actionneurs hydrauliques linéaires ou rotatifs (vérins à **simple ou double effet**).

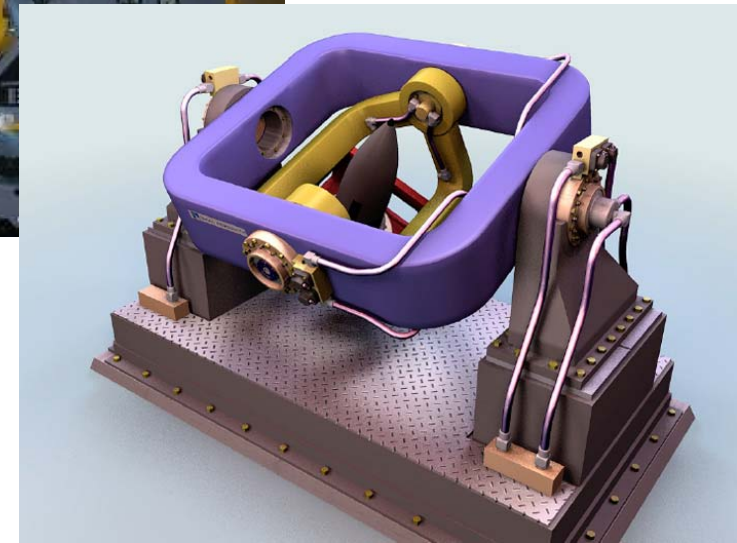
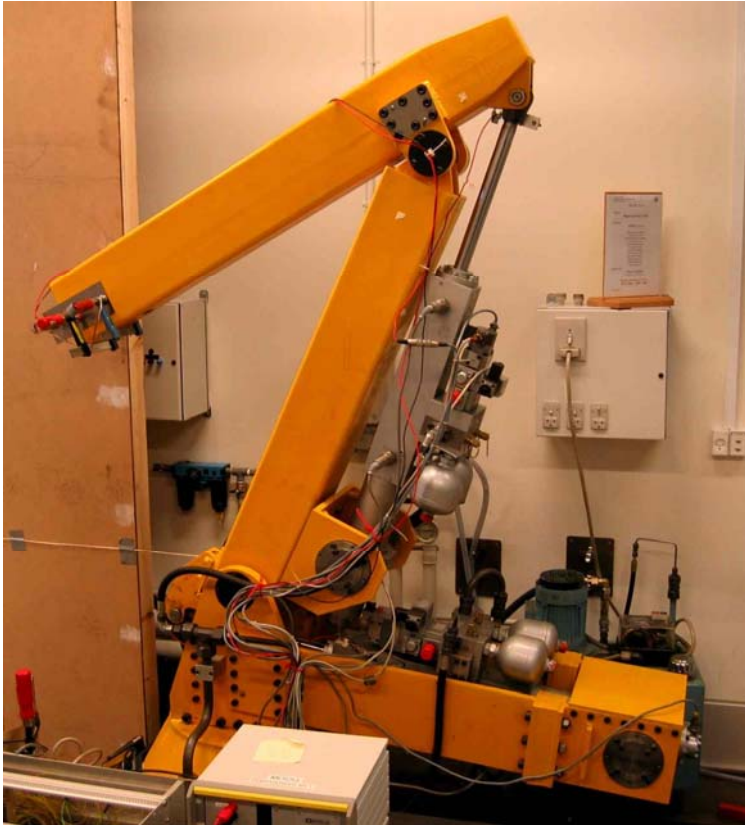
Ces derniers sont réalisés le plus souvent par des moteurs composés de vérins à simple effet, commandés par des distributeurs.

Les vitesses maximales de rotations sont relativement faibles, de l'ordre de **1000 rpm**, mais ils ont des couples élevés par rapport à leurs dimensions (typiquement 10Nm/kg, contre 1 Nm/kg pour les moteur électriques).

Ce type d'actionneurs est ainsi presque exclusivement réservé à la robotique lourde. Notons toutefois, que certaines applications de la robotique de précision font à nouveau appel à ce type de technologie.



Actionneurs hydrauliques



Positionneur hydraulique
à eau.

Actionneurs hydrauliques



Actionneurs hydrauliques : And What else?

Main bionique
hydraulique

Exosquelette à actionneurs hydrauliques – Santos-Dumont (Brazil)

Paraplegic Wearing Robot Suit Kicks Off World Cup in Brazil



Actionneurs pneumatiques

C'est une solution **bon marché** et **simple d'emploi** pour les mouvements **tout ou rien**.

Avantages de l'énergie pneumatique:

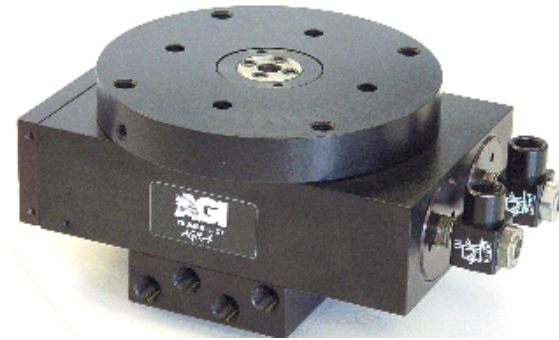
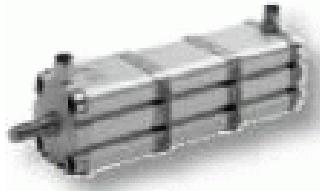
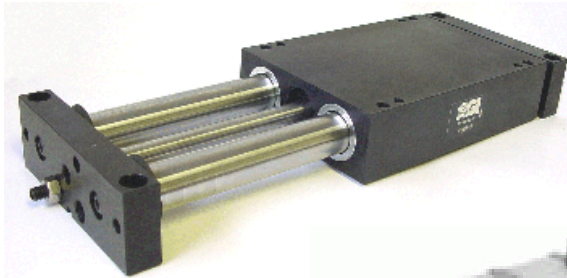
- **Disponible** sur chaque poste de travail en industrie,
- **Propre**,
- Les **fuites** (éventuelles) sont **sans risques**.
- **Affranchissement** d'un **conduit de retour** dans la plupart des cas.
- Mouvements **rapides**

Inconvénients:

- Contrôle en vitesse ou en position délicat à cause de la **compressibilité** de l'air (Délicat mais possible)
- Faible densité d'énergie véhiculée par rapport aux actionneurs hydrauliques.

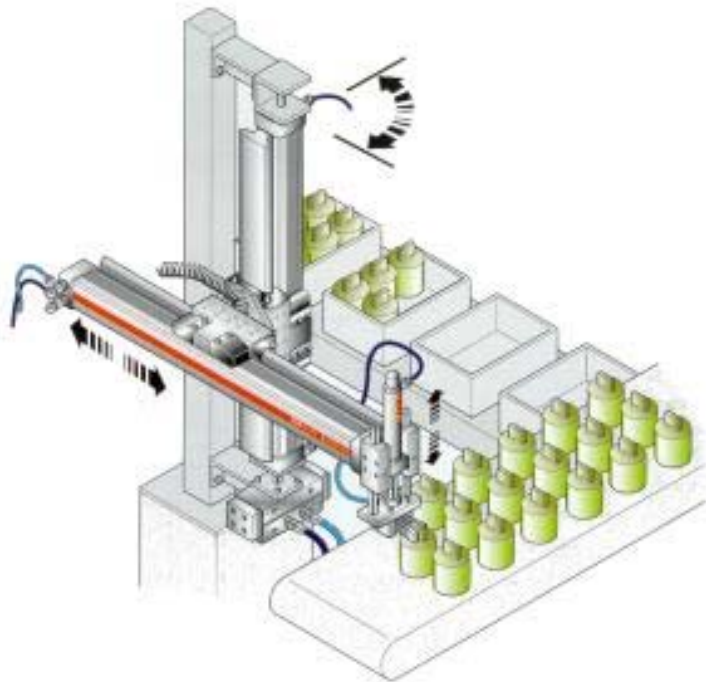
l'utilisation des actionneurs pneumatiques est généralement confinée aux préhenseurs ou à des axes de transferts à positions indexées.

Actionneurs pneumatiques (tout ou rien)



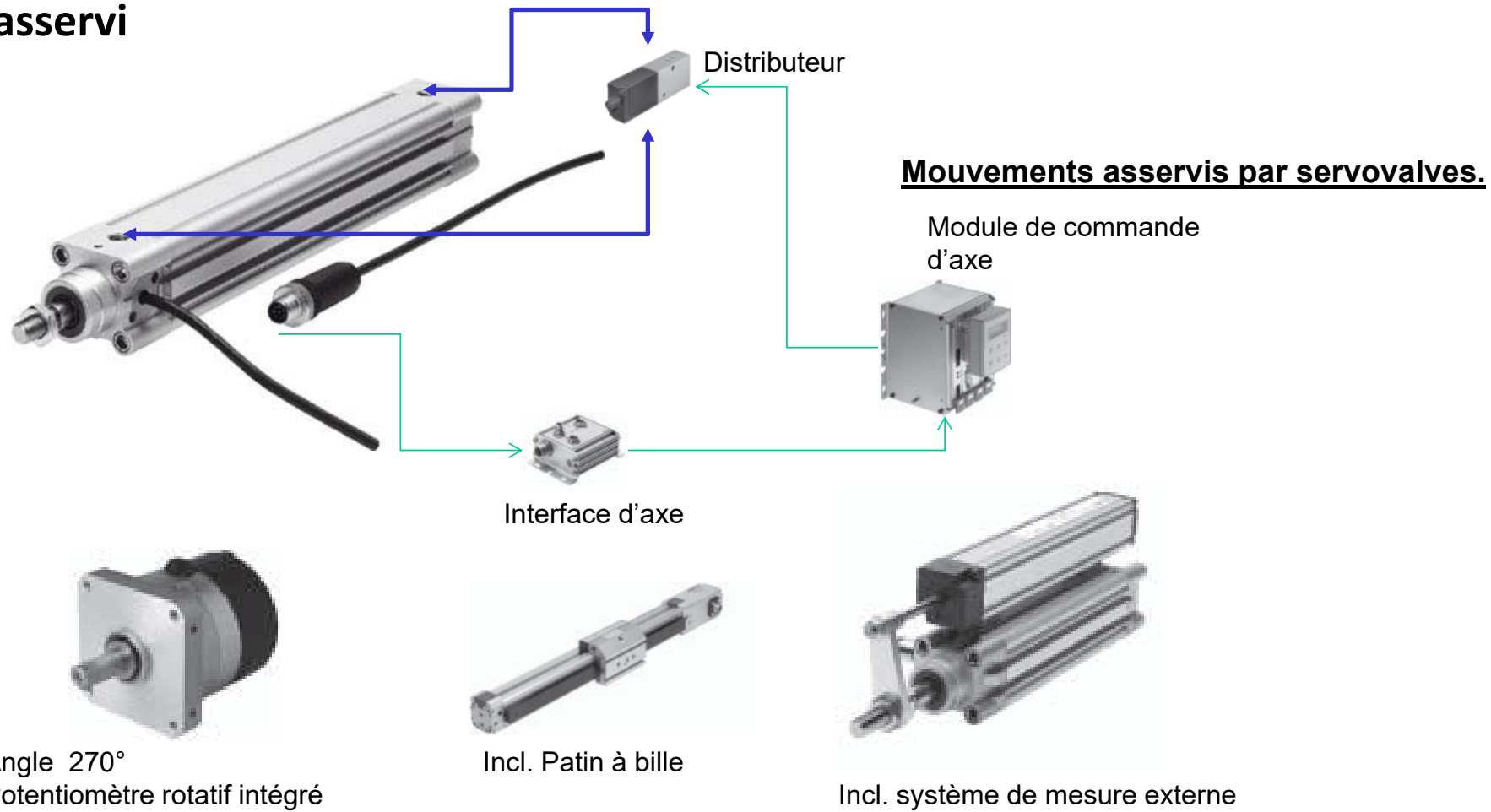
Mouvements indexés à positions fixes. Mouvements On/Off pour préhenseurs.

Construction **d'une séquence de mouvements automatisés** à partir de mouvements de bas (translation+rotation)



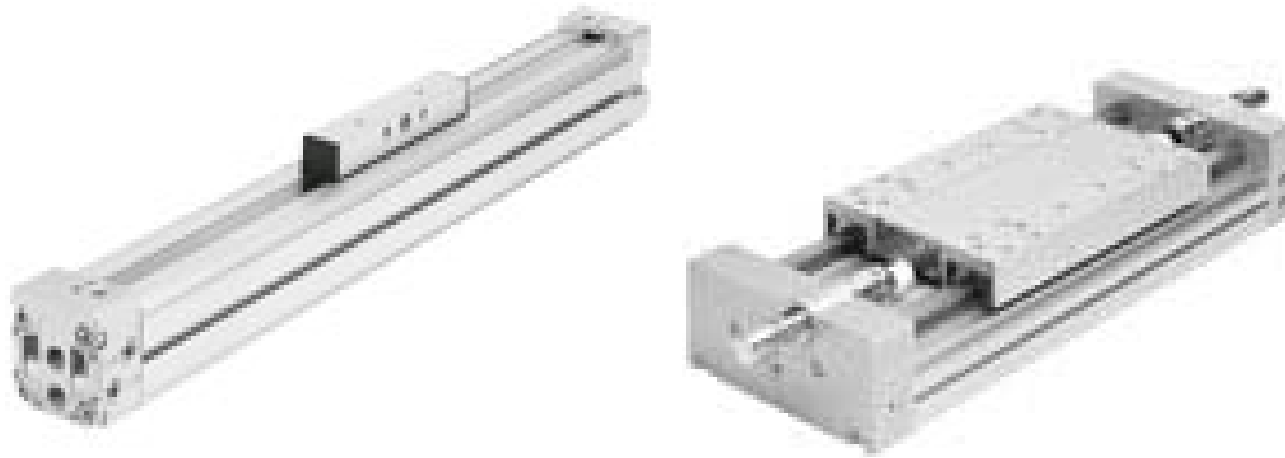
Actionneurs pneumatiques pour la robotique

Positionnement asservi



Actionneurs pneumatiques pour la robotique

Mouvements asservis par servovalves.



Avantages:

- Direct drive
- Compacité
- Haute capacité de force.

Inconvénients:

- Source d'énergie
- Contrôle

You said Pneumatic : And What else?

The Muscle suit

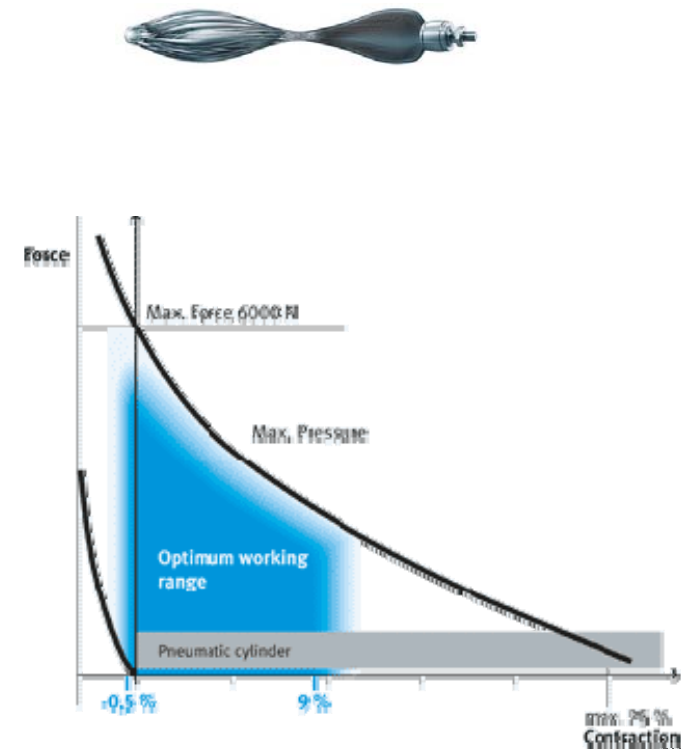


(!) Attention à la source d'énergie ?

Pneumatic muscles... From FESTO



- Actionnement direct
- Plateforme de Gough-Stewart
- 6 DDL



Actionneurs électromécaniques

L'énergie électrique est :

- **Disponible** partout et
- facilement transportable
- l'énergie la plus utilisée en robotique industrielle.

Avantages des actionneurs électromécaniques:

- **Prix** relativement **bas** des composants ;
- Fonctionnement **propre** et **silencieux**.
- Grande compétition dans le marché qui implique une **évolution croissante des technologies**.
- Et surtout **Maitrise du contrôle** et meilleure **précision**.

L'inconvénient principal est la **densité d'énergie** inférieure à celle de actionneurs hydrauliques.

Nous notons que les actionneurs électromécaniques font de plus en plus de progrès et s'imposent de plus en plus dans toutes les applications.

Comparaison des énergies spécifiques

$$w = W/V_a \quad \text{J/m}^3 \text{ ou N/m}^2$$

où W est l'énergie fournie et V_a le volume actif de l'actionneur.

$$v_h \text{ ou } v_p = p \quad \text{N/m}^2 \quad (\text{Actionneurs hydrauliques})$$

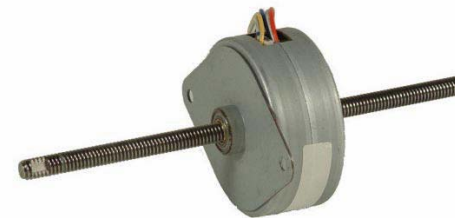
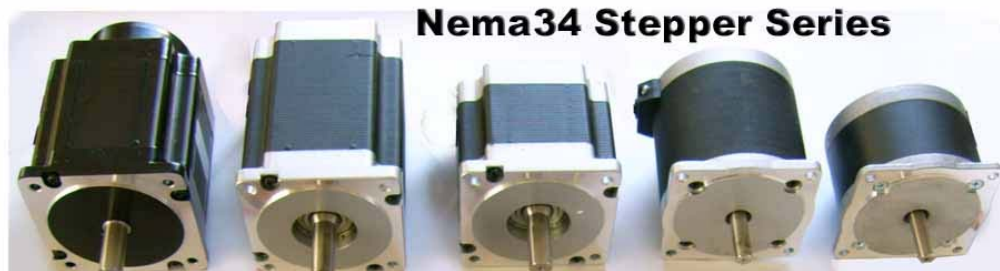
$$w_e = \frac{1}{2} \cdot B^2 / \mu_0 \quad \text{N/m}^2 \quad (\text{Actionneurs électromécaniques})$$

où B est le champ magnétique dans l'entrefer et μ_0 la perméabilité du vide ($0.4 \cdot 10^{-6}$ Vs/Am).

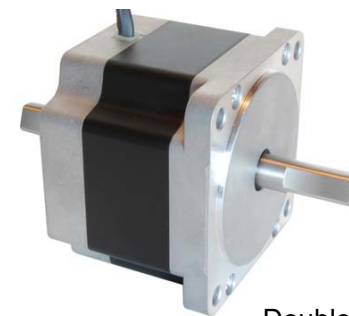
type d'actionneur	facteur limitatif	énergie spécifique [J/m ³]
hydraulique	pression maximale: 70 bar	$7 \cdot 10^6$
pneumatique	pression maximale: 6 bar	$0.6 \cdot 10^6$
électrique	champ magnétique (saturation): 1T	$0.4 \cdot 10^6$

Table 1 Comparaison des énergies spécifiques

I - Moteurs pas à pas (exemples)

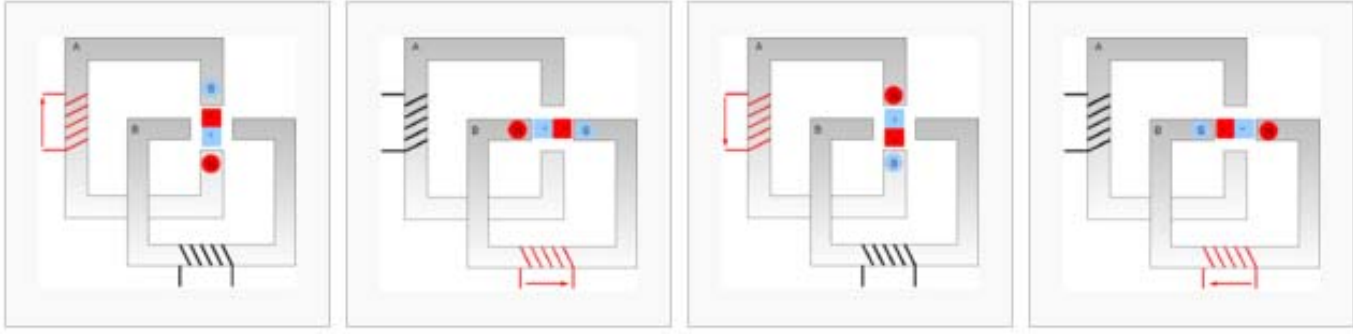
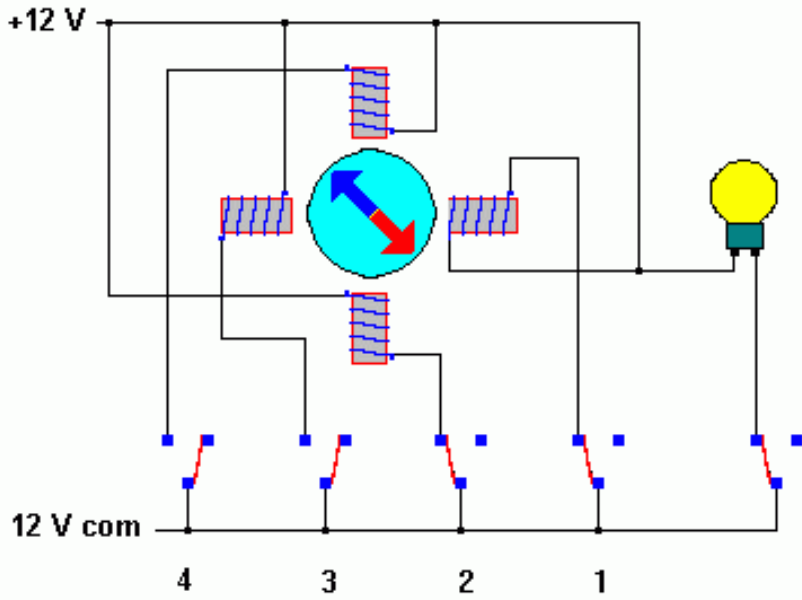


linear stepper motor configuration

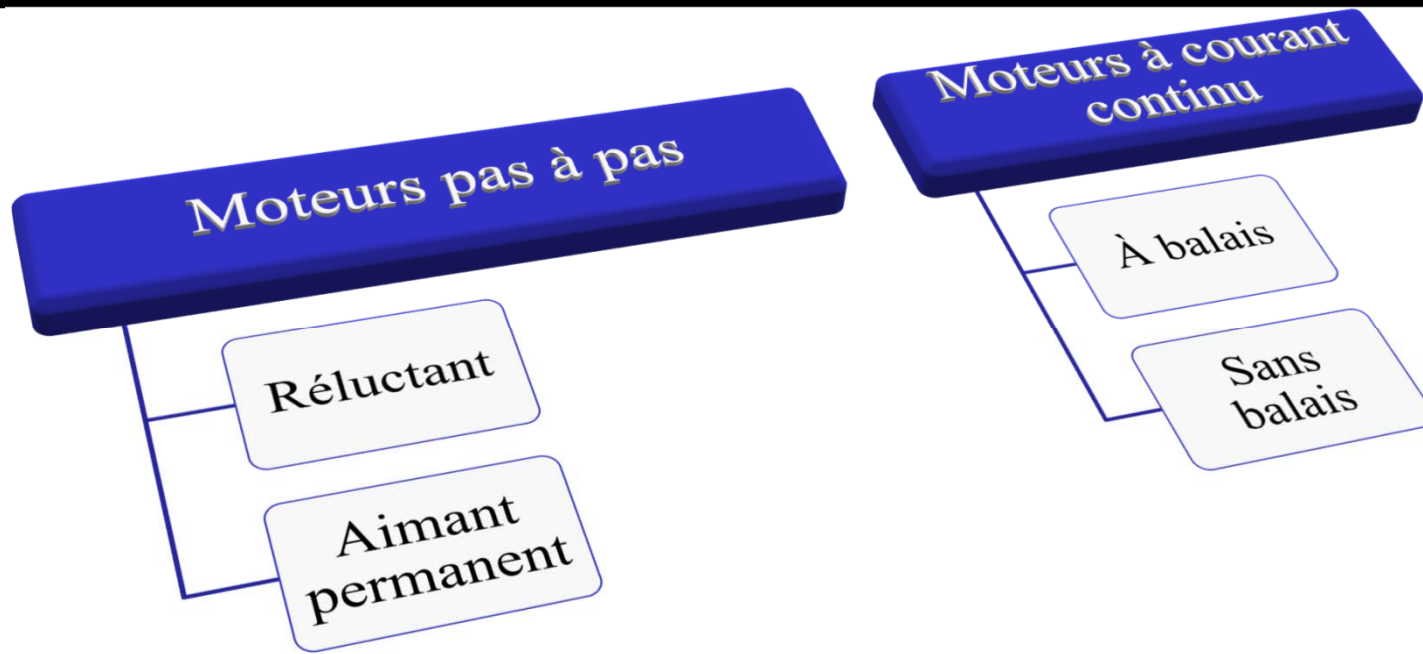


Double shaft for encoders or manual move

Moteurs pas à pas (électronique simple)



Principaux types d'actionneurs électromécaniques



Moteurs pas à pas

- ❑ Construction simple (leur coût est relativement bas, ils sont fiables et robustes),
- ❑ Ils sont simples à contrôler par des commandes digitales en boucle ouverte (suppression du capteur de position)
- ❑ Présentent un couple élevé à basse vitesse (jusqu'à 5 fois celui d'un moteur CC) permettant un entraînement direct.

Inconvénients de moteurs pas à pas

- ❑ La **limitation du nombre de pas par tour** (limitation de la résolution)
- ❑ la génération de vibrations (**bruit**, précision du système dégradée)
- ❑ La **vitesse maximale** plus faible

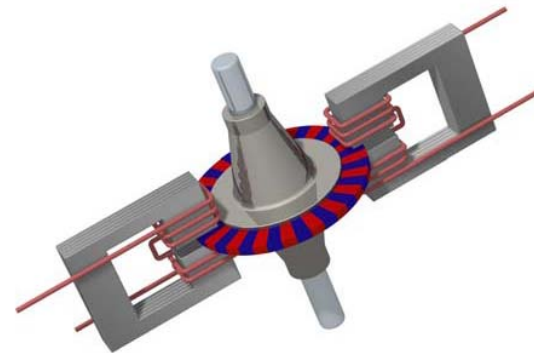
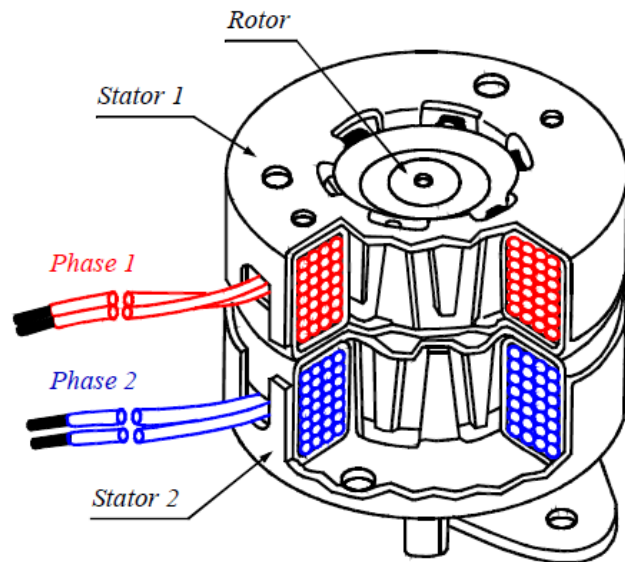
Les moteurs pas à pas peuvent être utilisés avec des capteurs de position moyennant l'utilisation d'une commande plus adaptée et on perd ainsi la simplicité de ces derniers.

Moteurs pas à pas à aimant permanent

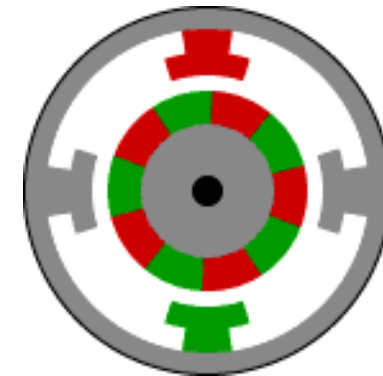
Le moteur pas-à-pas à aimant permanent possède **un ou plusieurs aimants permanents au rotor**. Il présente des positions fixes même sans être alimenté. Son **rendement est élevé**.

Caractérisé par une **alimentation de phases de signes alternés**. Deux phases sont suffisantes. Sa structure **ne permet pas** d'avoir **un grand nombre de pas par tour** généralement **entre 18 et 24**.

Ce type de moteur pas-à-pas est réservé aux applications simples en boucle ouverte.



Rotor constitué d'une suite d'aimants polarisés.
Patent Portescap (Groupe Danaher)



Moteurs pas à pas Réductant

Réductant (variable reluctance).

Le moteur pas-à-pas réductant **ne comporte pas d'aimant permanent**.

Il possède des **bobines distinctes au stator et un rotor ferromagnétique**.

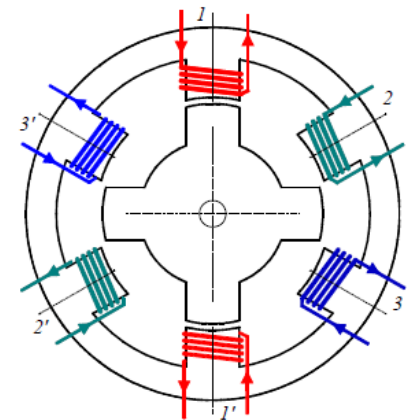
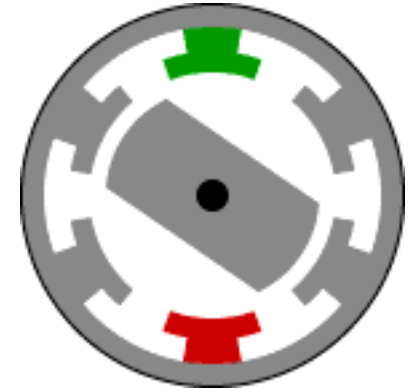
Il est robuste et bon marché. Ce type de moteur **n'a pas de position stable sans alimentation** (pas d'aimant). Son **couple et son rendement sont faibles**.

Par contre, sa petite inertie permet un **bon rapport couple sur inertie** (M/J). C'est un moteur à **haute capacité d'accélération et de décélération**.

Ce type de moteur est **insensible à la polarité du courant**. Il faut donc un **minimum de trois phases** pour avoir un mouvement dans les deux directions.

Ces moteurs sont utilisés pour **des entraînements simples de petites dimensions** (par exemple table pour le micro-positionnement).

Leur **nombre de pas par tour** est généralement compris entre **12 et 72**.

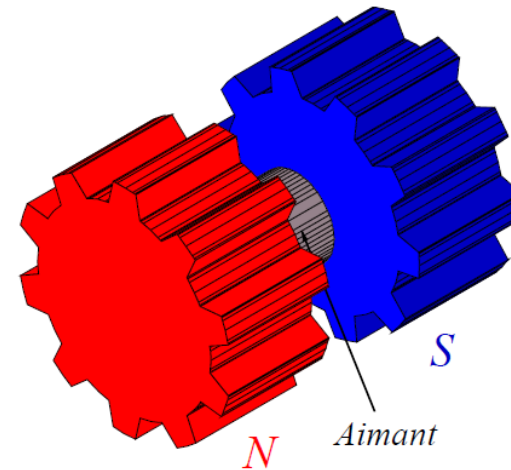
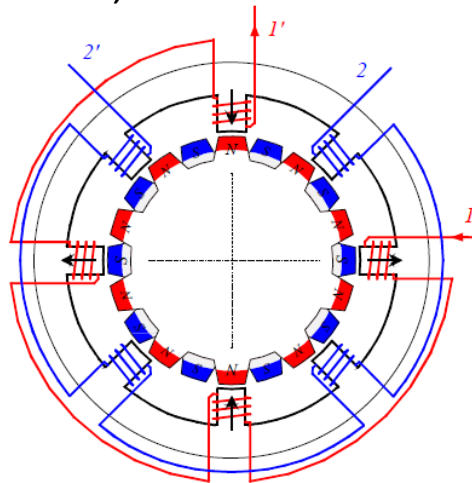
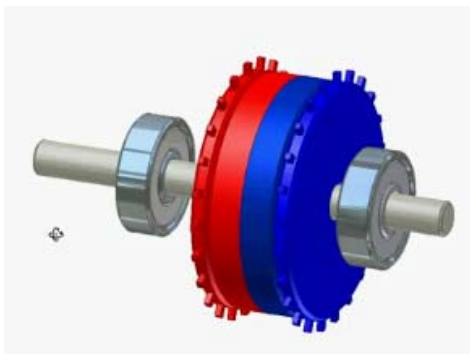


Moteurs pas à pas hybride ou réluctant polarisé

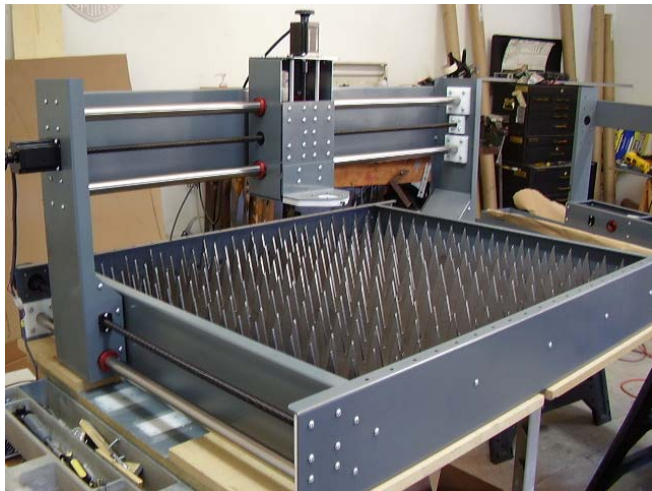
C'est le type de moteur pas-à-pas le plus utilisé actuellement pour des applications sophistiquées. Il peut avoir un nombre de pas par tour élevé, compris entre **24 et 400**.

Réunissent les avantages des moteurs pas à pas à réluctance variable et à aimants permanents

- un grand nombre de pas par tour,
- une fréquence propre mécanique importante,
- un couple massique élevé,
- un amortissement interne important,
- une mémoire de position.



Moteurs pas à pas (exemple de machines CNC)



CNC Router from CNC Shop (CH)



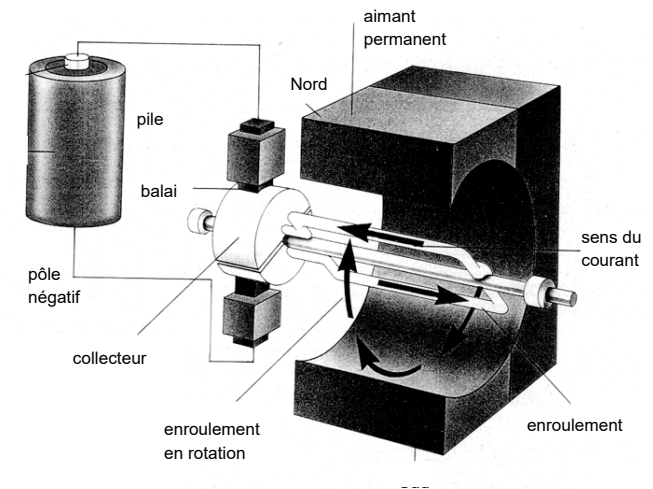
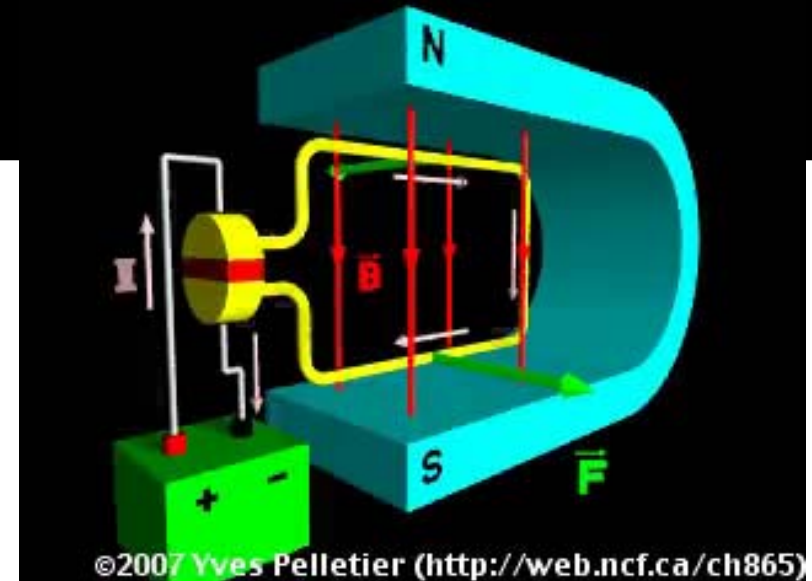
Moteur à courant continu à balais

Les **plus utilisés** en robotique légère à ce jour.
Ils sont **fiables**, d'un **prix intéressant** et un **grand choix existe** sur le marché.

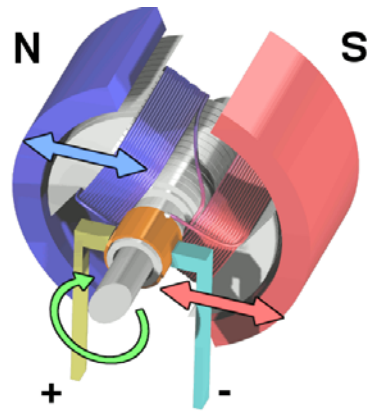
Leurs performances dynamiques sont très bonnes.

On distingue deux grandes familles :

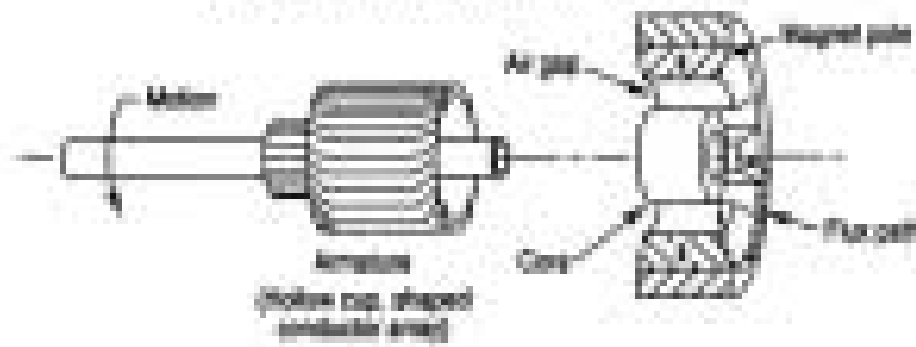
- Moteurs à rotor **avec fer**
- Moteurs rotor **sans fer**



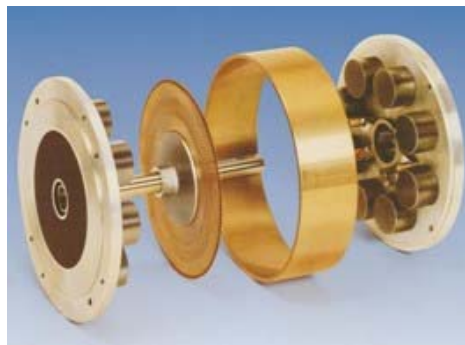
rotor avec fer



rotor cloche



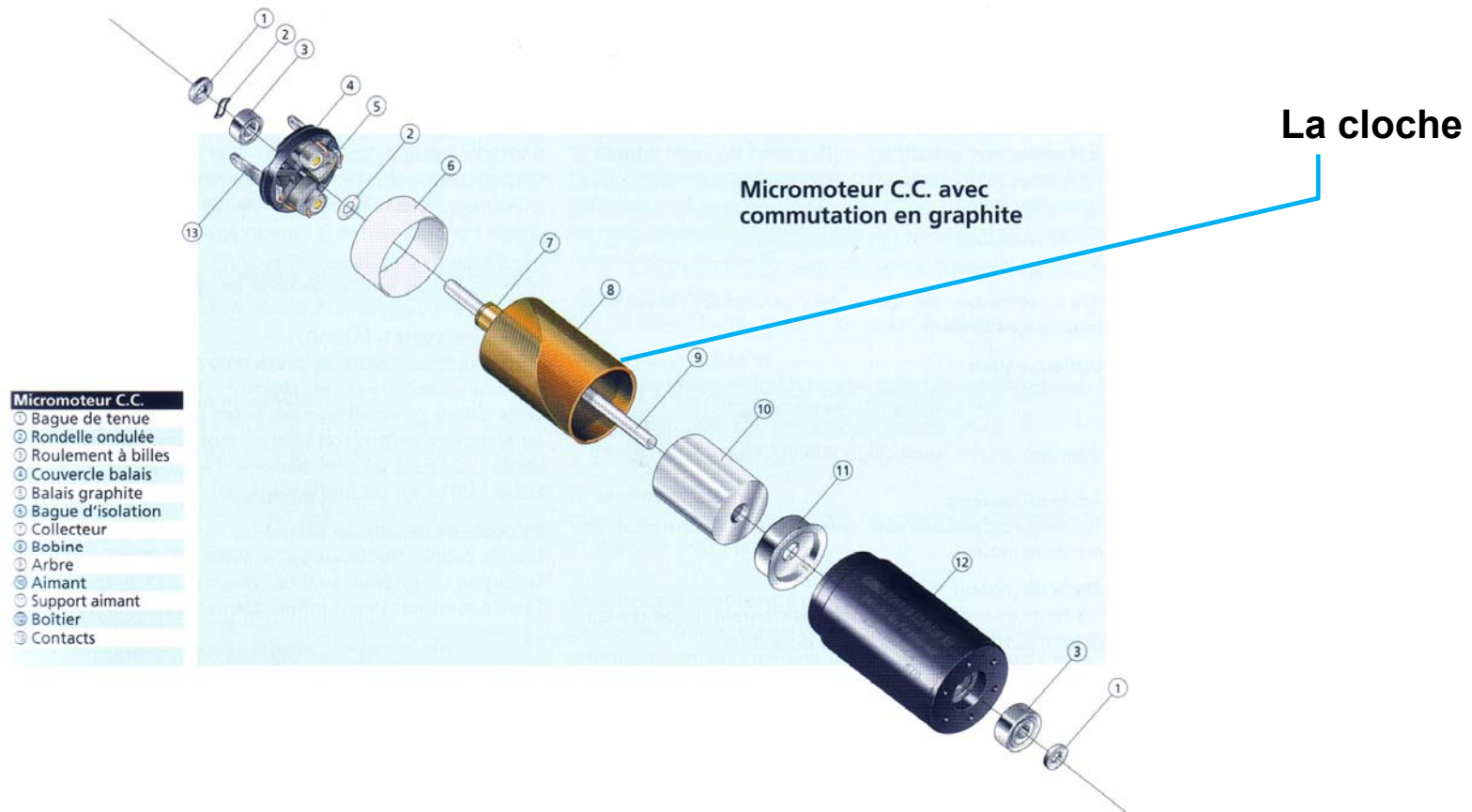
rotor imprimé



dit également
Pancake DC Motors



Moteurs à Courant continu à balais (à cloche)



Moteurs à Courant continu à balais

Rotor a fer versus sans fer

Les moteurs à **rotors avec fer** permettent d'avoir un **couple élevé** (le champ magnétique dans l'entrefer est grand). Par contre leur inertie est grande et ils ont des **pertes fer qui peuvent être très élevées au hautes vitesses**.

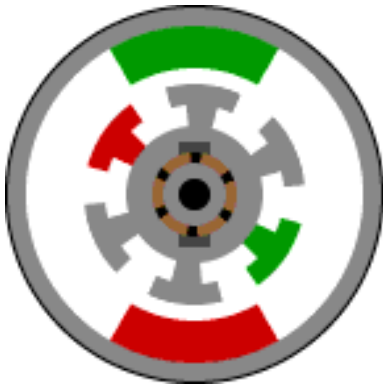
Les moteurs à **rotors sans fer** ont un **couple moins élevé**, mais leur **inertie est faible** ce qui est un avantage important en robotique où de grandes accélérations sont nécessaires. Leurs pertes fer sont très faibles.

Le rotor sans fer peut être soit de type imprimé (**printed motor**) ou de type **cloche**.

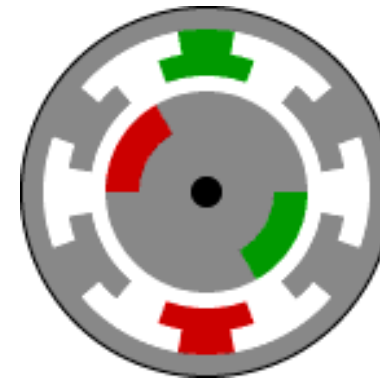
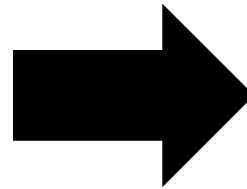
	Moteur DC avec rotor en fer	Moteur DC à cloche
Inertie du rotor	--	++
Dynamique	--	++
Couple	++	--
Vitesse	--	++
Coût	++	--

Moteurs à Courant continu sans balais

- ➔ La commutation est assurée d'une manière électronique :
Il n' y a **ni balais ni collecteur**
- ➔ Ces moteurs sont également appelés
moteurs à commutation électronique

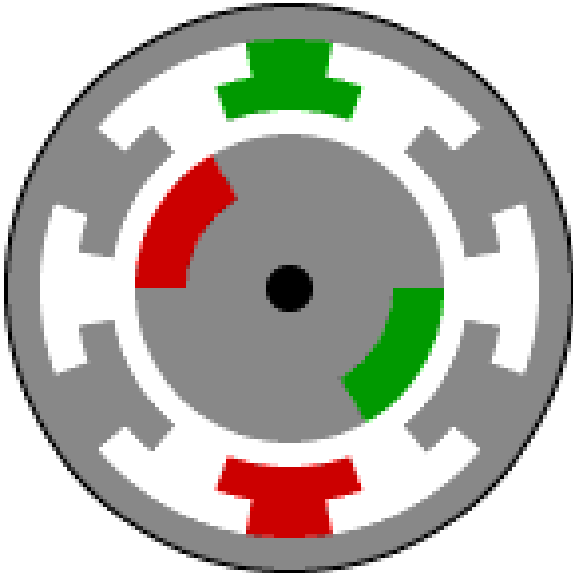
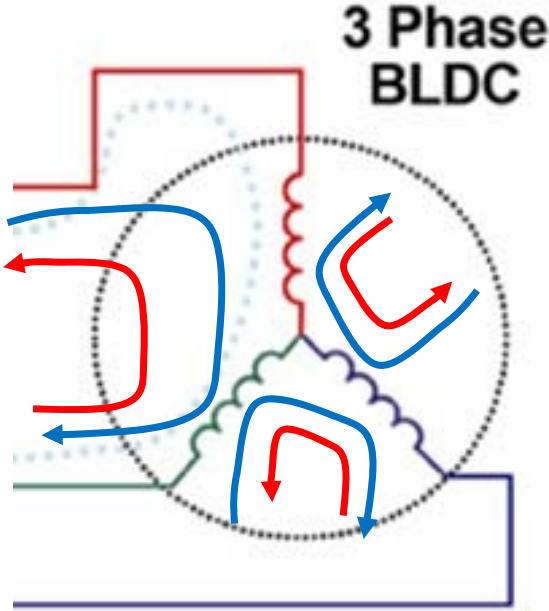


Commutation a balais



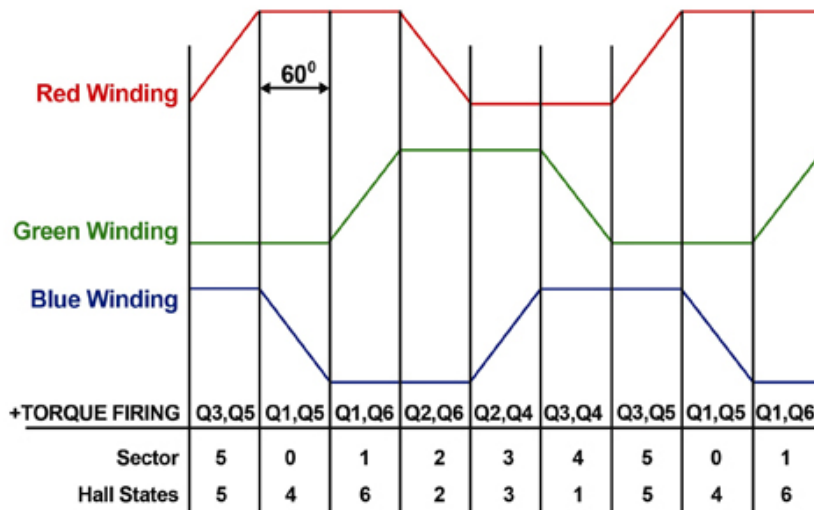
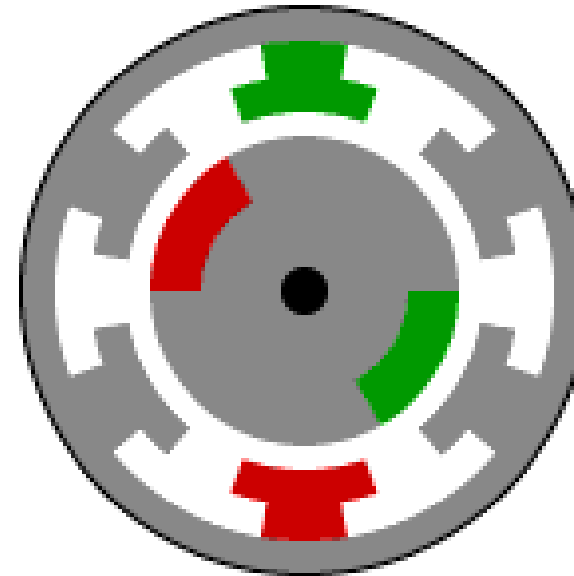
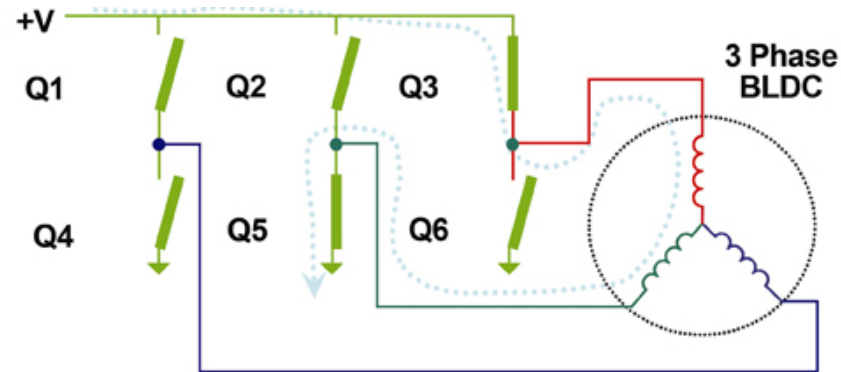
Commutation électronique

Moteurs à Courant continu sans balais : principe



Moteurs à Courant continu sans balais : principe

Commutation a 6 étapes



Moteurs à Courant continu sans balais- Résumé

Le collecteur des moteurs à courant continu est le point faible des moteurs à balais. Il limite leur durée de vie.

La commutation génère des perturbations électromagnétiques qui peuvent gêner l'électronique de commande ou les appareils proches. Des étincelles sont générées lors des commutations interdisant l'utilisation de ce type de moteur en milieu explosif.

Moteurs à courant continu sans balais

Les progrès de l'électronique ont permis de réduire les coût des moteurs avec leurs commandes.

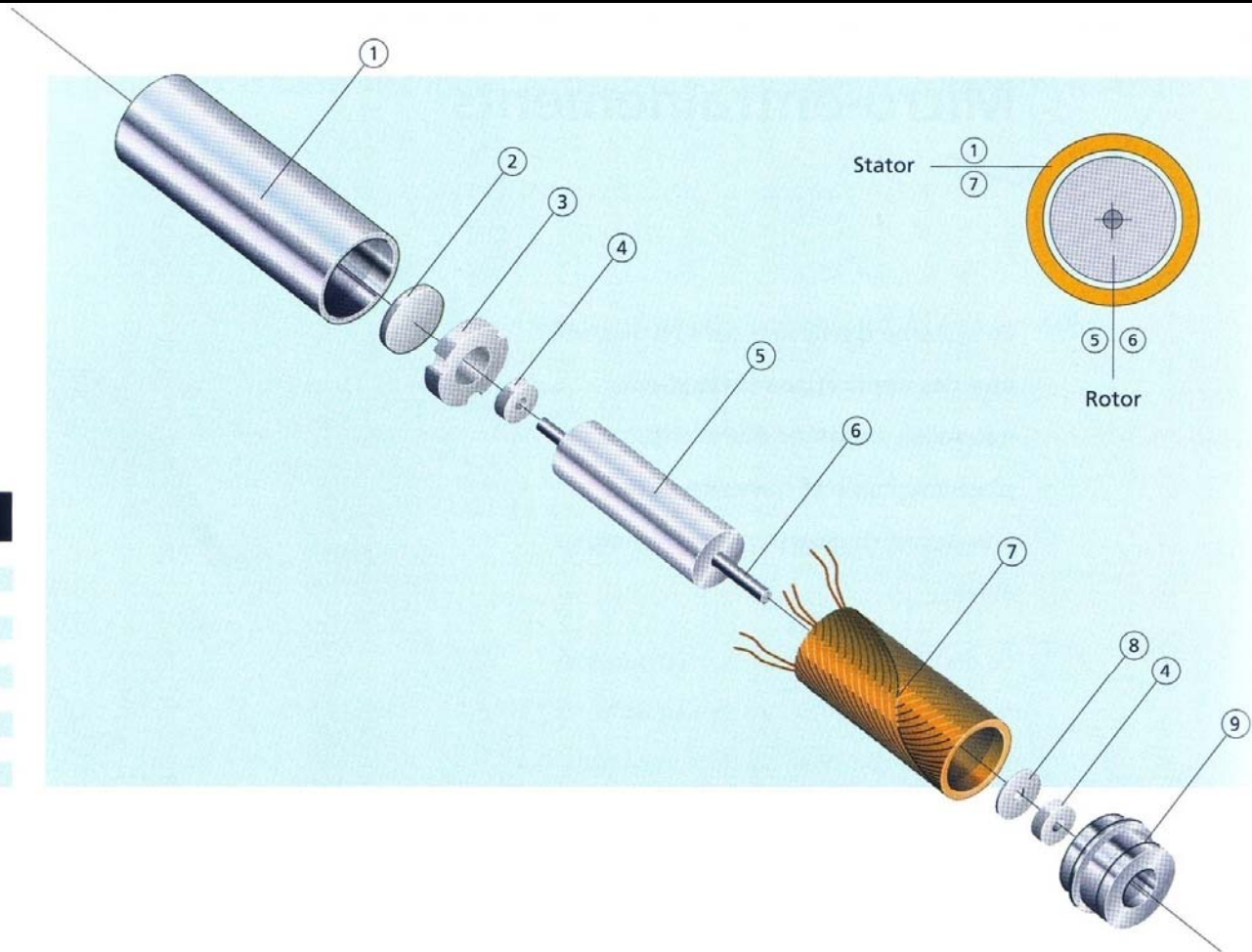
Ils **remplacent** de plus en plus les moteurs à courant continu à balais.

La **tendance actuelle** est de développer des **entraînements directs** permettant de supprimer les réducteurs.

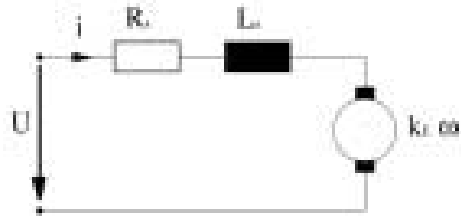
>> Confinés à des applications de haute gamme, techniquement très exigeantes.

**Micromoteur C.C.
sans balais**

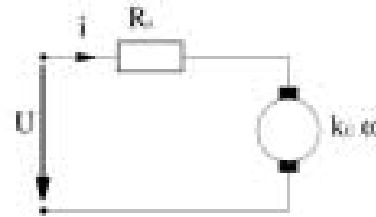
- ① Boîtier
- ② Couvercle
- ③ Support paliers
- ④ Palier
- ⑤ Aimant
- ⑥ Arbre
- ⑦ Bobine
- ⑧ Rondelle plate
- ⑨ Couvercle



Equations principales des Moteurs à Courant Continu



Simplifié



$$U = R_a \cdot i + k_E \cdot \omega + L_a \cdot \frac{\delta i}{\delta t} \quad [\text{V}]$$

$$U = R_a \cdot i + k_E \cdot \omega \quad [\text{V}]$$

$$M_s = k_M \cdot i - M_{fr} \quad [\text{Nm}]$$

où k_M est la constante de couple du moteur et M_{fr} le couple de frottement

La puissance à la sortie est
La puissance à l'entrée est

$$P_s = M_s \cdot \omega$$

$$P_e = U \cdot i$$

Pertes (P_p) = Pertes frottement (P_{fr}) + Pertes Joules dans les bobinages (P_j)

$$P_p = P_{fr} + P_j = M_{fr} \cdot \omega + R_a \cdot i^2 \quad [\text{W}]$$

Le bilan énergétique s'écrit :

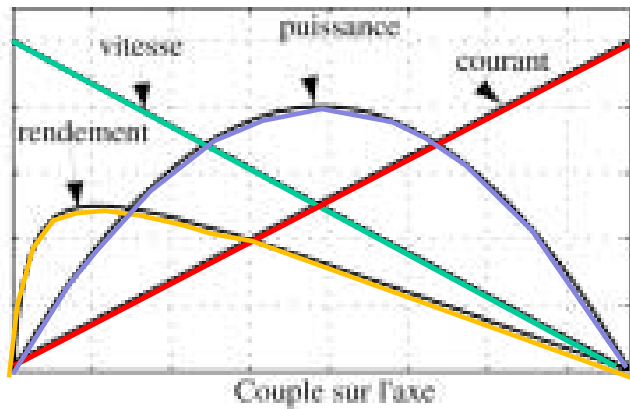
$$P_e = P_s + P_p$$

Le rendement est :

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

$$k_e = k_M = k \quad [\text{Vs}] \text{ ou } [\text{Nm/A}]$$

Equations principales des Moteurs à Courant Continu



courant [A]	$i = \frac{M_s}{k} + i_o$	$i_o = k \cdot M_o \text{ et } i_d = U/R_a$	$M_d = k \cdot \frac{U}{R_a}$
vitesse [rad/s]	$\omega = \frac{1}{k} \cdot [U - R_a \cdot (\frac{M_s}{k} + i_o)]$	$\omega_o = \frac{1}{k} \cdot (U - R_a \cdot i_o)$	
puissance [w]	$P_s = M_s \cdot \omega = (U - R_a \cdot i) \cdot (i - i_o)$	$P_{s_{max}} = \frac{1}{2} \cdot [U \cdot (i_d - i_o) - \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot (i_d^2 - i_o^2)]$	$i_{P_{max}} = \frac{1}{2} \cdot (i_o + i_d)$
rendement [-]	$\eta = \frac{P_s}{P_e} = 1 + \frac{i_o}{i_d} - \frac{i}{i_d} - \frac{i_o}{i}$	$\eta_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{i_o}{i_d}}\right)^2$	$i_{\eta_{max}} = \sqrt{i_o \cdot i_d}$

Table 2 Équations caractéristiques des moteurs à courant continu.

Pertes dans un moteur électrique

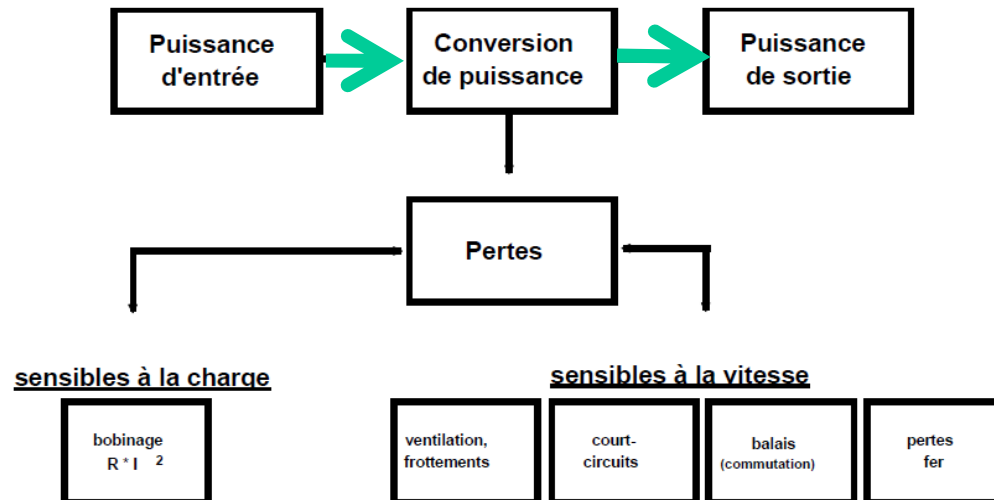
La transformation d'énergie électrique
en énergie mécanique



Pertes.

Dépendent :

- **de la charge** : pertes Joules dans le bobinage
- **de la vitesse** : Pertes dues aux frottements, à la ventilation
- **Matériaux**: Pertes fer liées au champ magnétique



Choix d'un moteur: Facteur de régulation

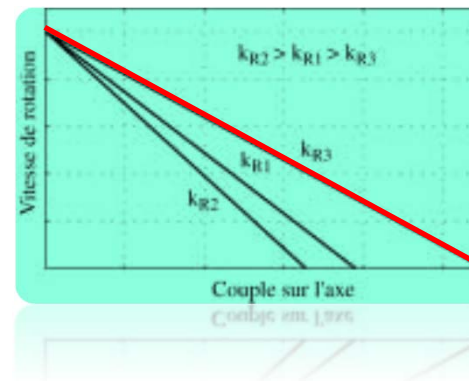
Soit la relation suivante:

$$\omega = \frac{1}{k} \cdot (U - R_a \cdot i_a) - \frac{R_a}{k^2} \cdot M_r \quad [\text{rad/s}]$$

$$k_R = \frac{R_a}{k^2} \quad [1/\text{Ws}^2] \text{ ou } [1/\text{Nms}]^2$$

Il correspond à la pente de **la caractéristique vitesse/couple** ($D\omega/DM_r$)

Ainsi, plus le facteur de régulation est petit, moins le moteur est sensible à une variation du couple de charge



Moteur + réducteur : Adaptation optimale

$$\sum M = \alpha \cdot J$$

$$r \cdot M_m = \alpha_{ch} \cdot J_{ch} + \alpha_{ch} \cdot r^2 \cdot J_m \quad \Rightarrow \quad \alpha_{ch} = \frac{r \cdot M_m}{r^2 \cdot J_m + J_{ch}}$$

$$\alpha_{ch} = \frac{r \cdot M_m}{r^2 \cdot J_m + J_{ch}} \quad \Rightarrow \quad r_{opt} = \sqrt{\frac{J_{ch}}{J_m}}$$

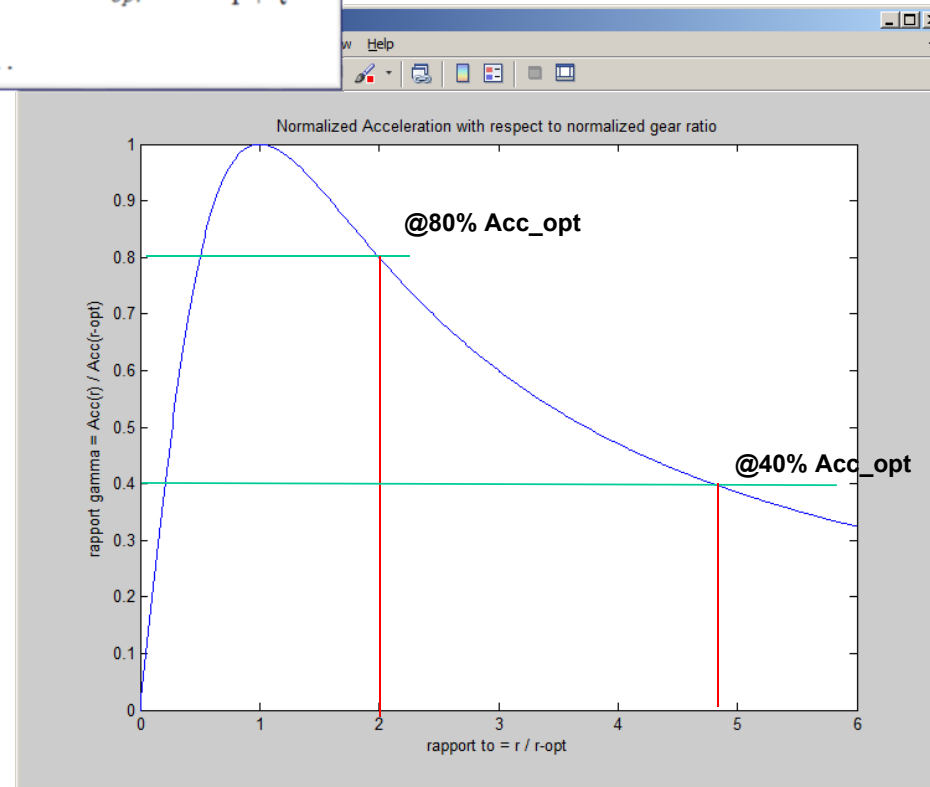
Donc l'inertie de la charge vue par le moteur vaut:

$$J_{ch}' = \frac{J_{ch}}{r_{opt}^2} = J_m$$

Moteur + réducteur : Adaptation optimale

$$\gamma = \frac{\alpha_{ch}}{\alpha_{opt}} = 2 \cdot \frac{\tau}{1 + \tau^2}$$

où $\tau = r/r_{opt}$.



1

Exercice 3 de la série 8

Soit l'axe

moteur + réducteur + bras du positionneur ci-contre.

Réducteur: GP 62 A diam62mm

reduc = 181

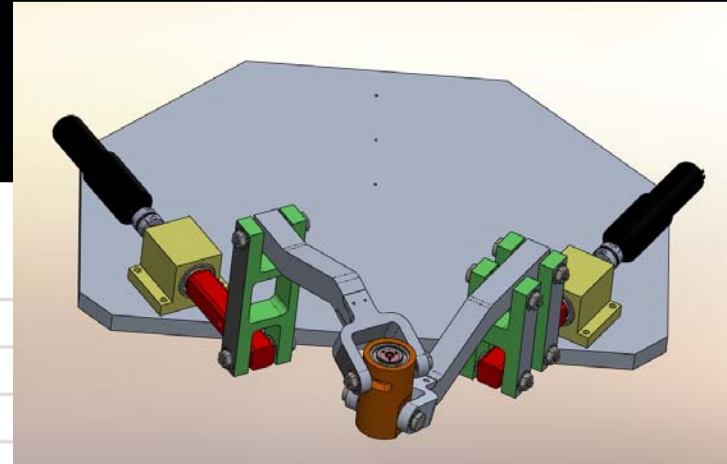
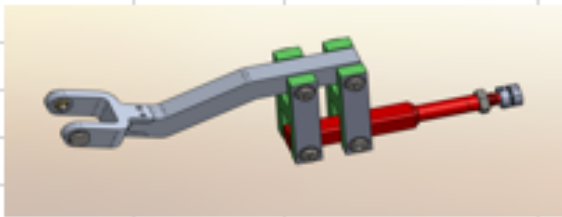
$I_{\text{reduc}} = 88 \text{ gcm}^2$

Moteur: RE 50

$I_{\text{mot}} = 542 \text{ gcm}^2$

$M_{\text{mot}} = 420 \text{ mNm}$

Kg.m2	Jload		
		1,01E-01	3,36E-02



- *Quel le moment d'inertie équivalent ramené à la sortie ?*
- *Quel est le rapport de réduction optimal pour chaque configuration ?*
- *Sommes nous trop loin des performances optimales ?*

Choix Moteur + réducteur : optimisation des pertes

$$p_J(t) = R_a \cdot i^2 = R_a \cdot \left(\frac{M_m(t)}{k}\right)^2$$

Sachant $\alpha_{ch} = \frac{r \cdot M_m}{r^2 \cdot J_m + J_{ch}}$

➔ $M_m(t) = J_m \cdot \alpha_m(t) + \frac{1}{r} \cdot J_{ch} \cdot \alpha_{ch}(t) = \alpha_{ch}(t) \cdot r \cdot \left(J_m + \frac{J_{ch}}{r^2}\right)$

L'énergie dissipée se calcule en intégrant l'équation 38 sur le temps t_c :

$$W_m = \underbrace{\frac{R_a}{k^2}}_{\text{moteur}} \cdot \underbrace{r^2 \cdot \left(J_m + \frac{J_{ch}}{r^2}\right)^2}_{\text{réduction}} \cdot \underbrace{\int_{t_c} \alpha_{ch}^2(t) \cdot dt}_{\text{profil de vitesse}}$$

Optimisation par le rapport de transmission

$$\underbrace{r^2 \cdot \left(J_m + \frac{J_{ch}}{r^2}\right)^2}_{\text{réduction}}$$

Optimisation par le profil de vitesse

$$\underbrace{\int_{t_c} \alpha_{ch}^2(t) \cdot dt}_{\text{profil de vitesse}}$$

Optimisation des pertes par le rapport de transmission

Cela revient à minimiser

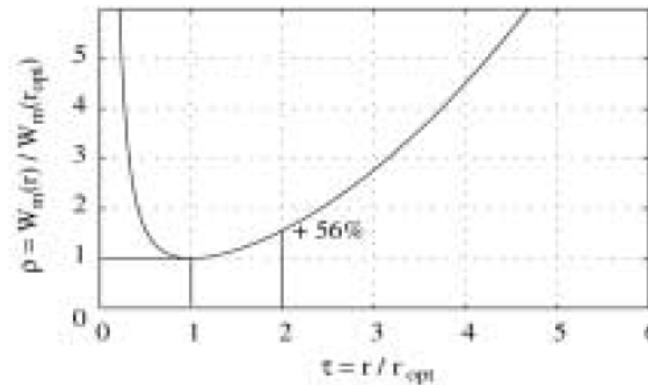
$$r^2 \cdot \left(J_m + \frac{J_{ch}}{r^2} \right)^2$$



$$r_{opt} = \sqrt{\frac{J_{ch}}{J_m}}$$

Ainsi nous obtenons
le même résultat
que pour

$$\rho = \frac{W_m(r)}{W_m(r_{opt})} = \frac{1}{4} \cdot \left(\tau + \frac{1}{\tau} \right)^2$$

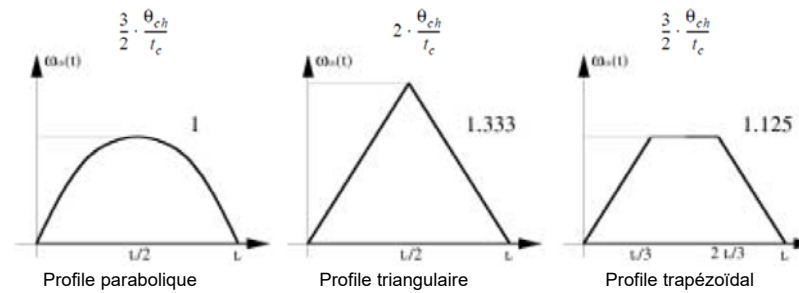


Optimisation des pertes par le profil de vitesse

Cela revient à minimiser

$$\int_{t_c} \alpha_{ch}^2(t) \cdot dt$$

profil de vitesse



type de profil	vitesse de pointe	facteur de puissance
parabolique	$\frac{3}{2} \cdot \frac{\theta_{ch}}{t_c}$	1
triangulaire	$2 \cdot \frac{\theta_{ch}}{t_c}$	1.333
trapézoïdal	$\frac{3}{2} \cdot \frac{\theta_{ch}}{t_c}$	1.125

